LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
LUT School of Energy Systems
LUT Kone
BK10A0401 Kandidaatintyö ja seminaari

HITSAUKSEN REAALIAIKAISEN NDT-TARKASTUKSEN NYKYTILANNE
CURRENT SITUATION OF REAL-TIME NDT-INSPECTION IN WELDING

Ville Ahokas 16.6.2016
Tarkastaja: Professori Jukka Martikainen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT Energiajärjestelmät
LUT Kone

Ville Ahokas

Hitsauksen reaaliaikaisen NDT-tarkastuksen nykytilanne

Kandidaatintyö

2016

46 sivua, 17 kuvaa ja 1 taulukko

Tarkastaja: Professori Jukka Martikainen

Hakusanat: NDT, reaaliaikainen NDT, hitsaus, MIG/MAG, TIG

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on selvittää hitsien tarkastukseen käytettyjen NDT-menetelmien nykytilannetta. Työssä kerrotaan mitä reaaliaikainen NDT-tarkastus on ja mitä menetelmiä siihen voidaan käyttää. Työn tarkoituksena on antaa lukijalle kokonaiskuva NDT-tarkastuksen nykytilasta ja siinä käytettävistä menetelmistä. Tutkimus suoritettiin kirjallisuuskatsauksena. Kirjallisuuskatsaus on luonteeltaan toteava. Lähteiden etsintä suoritettiin suurimmalta osin Internet-hakuna.

NDT-tarkastusmenetelmät voidaan jakaa kahteen pääkategoriaan; pinta- ja volymetrisiin menetelmiin. Kaikki tarkastusmenetelmät eivät sovellu reaaliaikaiseen tarkastukseen. Hitsien tarkastuksessa käytetyimmät reaaliaikaiset menetelmät ovat: ultraäänitarkastus, radiografinen tarkastus, optinen spektroskopia, termografia ja pyörrevirtatarkastus. Kaikilla reaaliaikaisilla menetelmillä on omat vahvuutensa ja heikkoutensa. Työssä esitetään myös CASE-esimerkkejä reaaliaikaisesta hitsien tarkastamisesta.

Tärkeimpinä johtopäätöksinä voidaan nähdä se, että hitsien NDT-tarkastuksen onnistuminen on aina hyvin tapauskohtaista ja riippuu useista muuttujista. Tästä syystä tällä hetkellä NDT-tarkastusmenetelmistä ei voi valita parasta kaikkiin käyttökohteisiin sopivaa menetelmää. Monessa prosessissa NDT-tarkastustehokkuutta ei määritä mekaanisen laitteiston mittaustarkkuus, vaan tulosten analysointiin käytettyjen algoritmien tehottomuus. Tutkimuksessa esitetään myös idea hybridi-NDT-tarkastusjärjestelmästä, jolla saataisiin havaittua tehokkaasti sekä pinta- että volumetrisia virheitä.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Ville Ahokas

Current situation of real-time NDT-inspection in welding

Bachelor's thesis

2016

46 pages, 17 pictures and 1 table

Examiner: Professor Jukka Martikainen

Keywords: NDT, real-time NDT, online, welding, MIG/MAG, TIG

This bachelor's thesis is focused on real-time NDT inspection and the current methods available for it. The main aim of this bachelor's thesis is to find out the current situation of real-time NDT methods used for inspecting welds. This work was conducted as a literary review. The type of this literary review is evaluative. Most of the reference articles used were searched via Internet.

NDT inspection methods can be divided into two main categories; surface and volumetric methods. All inspection methods cannot be used in real-time applications. The most used real-time methods today are: ultrasonic testing, radiography, optical spectroscopy, thermography and eddy current inspection. All these methods have their own distinctive strengths and weaknesses. This thesis work also highlights some CASE-examples of real-time weld inspection.

The most crucial conclusions include the facts that weld NDT inspection needs to be handled on a case-by-case basis and the results of inspection depend on multiple different variables. Because of these facts it is impossible to choose a reference method suitable for every kind of use. In real-time applications the effectiveness of inspection is not determined by the accuracy of the mechanical equipment but the ineffectiveness of the analyzing algorithms used. This study also represents an idea of a hybrid-NDT inspection system that can efficiently identify both surface and volumetric flaws.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
SISÄLLYSLUETTELO
SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

1 JOHDANTO 7
1.1 Tutkimusongelma, -kysymykset ja tutkimuksen tavoite 8
1.2 Seminaarityön aihepiirin rajaukset 8
2 KIRJALLISUUSTUTKIMUKSEN MENETELMÄT 9
2.1 Tiedonhakutavat 9
2.2 Käytetyt tietokannat 9
2.3 Tiedonhaun tulosten analysointitavat 9
3 NDT-TARKASTUKSEN TEORIAA JA REAALIAIKAISTEN MENETELMIEN ESITTELY 10
3.1 Radiografinen tarkastus 11
3.2 Ultraäänitarkastus 13
3.3 Pyörrevirtatarkastus 15
3.4 Termografia 17
3.5 Optinen spektroskopia 19
3.6 Muita reaaliaikaisia menetelmiä 20
4 REAALIAIKAISTEN NDT-MENETELMIEN EDUT JA HEIKKOUDET 22
4.1 Optinen spektroskopia 23
4.2 Ultraääni 24
4.3 Radiografinen tarkastus 26
4.4 Termografia 28
4.5 Pyörrevirtatarkastus 28
4.6 CASE-esimerkkejä 30
4.6.1 Polttoainetankin TIG-hitsin termografinen online-tarkastus 30
4.6.2 Radiografinen NDT putkimaisissa kappaleissa 33
4.6.3 Optisia NDT-kokeiluja höyrygeneraattorien valmistusprosessissa 35

5 POHDINTA 38
5.1 Kirjallisuuskatsauksen tuloksien analysointi 39
5.2 Tutkimuksen luotettavuus ja objektiivisuus 40
5.3 Jatkotutkimusaiheet 41
6 YHTEENVETO 42
LÄHTEET 43

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

e	Neperin luku
Te	elektronilämpötila
ANN	Keinotekoinen neuroverkko (Artificial Neural Network)
CCD	Varauskytketty kenno (Charge-Coupled Device)
CR	Tietokoneistettu radiografia (Computed Radiography)
DR	Digitaalinen radiografia (Digital Radiography)
EMAE	Elektromagneettinen akustinen emissio (Electromagnetic Acoustic Emission)
EMAT	Elektromagneettinen äänianturi (Electromagnetic Acoustic Transducer)
FMC	Täyden matriisin sieppaus (Full-Matrix Capture)
FPD	Levydetektori (Flat Panel Detector)
FPS	Kuvaa per sekunti (Frames per Second)
IF	Vaikuttavuuskerroin (Impact Factor)
IQI	Kuvanlaatuindikaattori (Image Quality Indicator)
IR	Infrapuna (Infrared)
NDT	Rikkomaton aineenkoetus (Non-Destructive Testing)
PZT	Lyijy-zirkonaatti-titanaatti (Lead Zirconate Titanate)
RMS	Neliöllinen keskiarvo (Root Mean Square)
ROI	Haluttu kuva-alue (Region of Interest)
RTR	Reaaliaikainen radiografia (Real-Time Radiography)
SOI	Halutut spektrin taajuusalueet (Spectrum Bands of Interest)
SWOT	Nelikenttäanalyysi (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats)
SNR	Signaali-kohina–suhde (Signal-to-Noise Ratio)
TFM	Kokonaisfokusointimetodi (Total Focusing Method)
ToF	Kulkuaika (Time of Flight)
TUKES	Turvallisuus- ja kemikaalivirasto
UV	Ultraviolettivalo (Ultraviolet Light)
2D	Kaksiulotteinen (Two Dimensional)
3D	Kolmiulotteinen (Three Dimensional)

1 JOHDANTO

Monissa käyttökohteissa, kuten ydinvoimaloissa tai kuormaa kantavissa rakenteissa hitsin virheiden minimointi saattaa olla rakenteen eheyhden kannalta ratkaisevassa asemassa. Suomessa rakenteiden laadun varmistamiseksi esimerkiksi Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (TUKES) valvoo ja ohjeistaa yrityksiä lainsäädännön mukaisten rakenteiden valmistamisessa. Hitsien riittävän laadun varmistamiseksi useilla yrityksillä on käytössä omia laadunhallintajärjestelmiä ja hitseille suoritetaan valmistuksen jälkeisiä testejä, joilla pyritään selvittämään niissä esiintyvien virheiden laatua ja lukumäärää. Testit ovat, riippuen tarkastuskohteesta, joko ainetta rikkovia tai rikkomattomia. Tällaiset jälkikäteen tehtävät testit ovat usein suoritustavaltaan manuaalisia, joten ne lisäävät tuotantoaikaa ja kustannuksia.

Nykyisin useat hitsausprosessit pyritään automatisoimaan ja adaptiiviset hitsausjärjestelmät tekevät tuloaan. Myös aineenkoetuksesta halutaan vaivatonta, tarkkaa sekä kustannustehokasta ja näistä syistä johtuen yritykset panostavat rikkomattomaan aineenkoetukseen. Rikkomaton aineenkoetus kehittyy jatkuvasti uusien materiaalien, hitsausprosessien ja tutkimusmenetelmien syntyessä.

Rikkomaton aineenkoetus (NDT) käsittää laajan kirjon menetelmiä, joita voidaan käyttää esimerkiksi tarkastukseen, testaukseen tai tutkimukseen. Rikkomattomalla aineenkoetuksella pyritään selvittämään joko tuotteen ominaisuuksia tai valmiin kappaleen sisältämiä vikoja, kuten epäsäännöllisyyksiä tai epäjatkumakohtia, vahingoittamatta valmista kappaletta.

Reaaliaikaisella NDT-tarkastuksella ja hitsausparametrien kontrolloinnilla on mahdollista parantaa hitsin laatua ja kohottaa tuottavuutta automatisoidussa hitsauksessa. Hitsiin syntyvät virheet voidaan useimmiten välttää parametreja säätämällä. Jos virheitä kuitenkin esiintyy, ne löydetään reaaliaikaisen monitoroinnin avulla heti, ja hitsausprosessi voidaan keskeyttää ennen kuin esimerkiksi hitsataan lisää palkoja virhekohdan päälle. Näin säästetään aikaa ja kuluja, koska jälkityöstön ja –tarkastuksen määrä vähenee. (Ditchburn & Burke & Scala, 1996, s. 115.)

1.1 Tutkimusongelma, -kysymykset ja tutkimuksen tavoite

Tutkimusongelmaksi muodostui reaaliaikaisen NDT-tarkastuksen nopean kehityksen aiheuttama menetelmien kartoittamisen ja vertailun vaikeus. Tutkimusongelman pohjalta tutkimuskysymyksiksi määriteltiin; ”Mikä on reaaliaikaisen NDT-tarkastuksen nykytilanne ja mitä prosesseja siihen voidaan käyttää?” ja ”Mitkä ovat erilaisten reaaliaikaisten NDT-tarkastusmenetelmien edut ja heikkoudet?”

Tutkimuksen tavoitteena on kartoittaa hitsauksen NDT-tarkastuksen nykytilannetta ja perehtyä erityisesti reaaliaikaisiin menetelmiin. Työssä myös vertaillaan menetelmien etuja ja haittoja sekä esitellään CASE-esimerkkejä olemassa olevista käyttö- ja tutkimuskohteista. Tutkimuksen taustalla on Lappeenrannan teknilliselle yliopistolle hankittu robotisoitu adaptiivinen MAG-hitsausjärjestelmä, joka voisi tulevaisuudessa hyödyntää reaaliaikaista NDT-tarkastusta.

1.2 Seminaarityön aihepiirin rajaukset

Tarkempaan tarkasteluun NDT-menetelmistä otettiin vain reaaliaikaiseen tarkastukseen soveltuvat prosessit. Tutkimuksessa käsiteltiin laajalti vain kaarihitsausprosessien tarkastamista, ei esimerkiksi laserhitsausta tai vastuspistehitsausta. Hitsausvirheiden syntyyn johtavia syitä tai prosessiparametrien vaihtelun vaikutusta hitsiin ei käsitellä. Myöskään yrityksissä käytössä olevia laadunhallintajärjestelmiä ei käsitellä. Työssä on käsitelty vain mekanisoitujen tai automatisoitujen hitsausprosessien NDT-tarkastusta.

2 KIRJALLISUUSTUTKIMUKSEN MENETELMÄT

Tutkimus toteutettiin kirjallisuustutkimuksena, joka on luonteeltaan toteava. Kirjallisuustutkimusta aloitettaessa sen tavoite oli selkeä; haluttiin löytää mahdollisimman paljon tietoa johdannossa määriteltyihin tutkimusongelmaan ja tutkimuskysymyksiin, poissulkien rajauksissa mainitut aihealueet.

2.1 Tiedonhakutavat

Tiedonhaku suoritettiin pääosin etsimällä tieteellisiä artikkeleita Internetistä löytyvien tiedonhakujärjestelmien avulla. Tiedonhakua lähdettiin suorittamaan lohkostrategisesti yhdistelemällä tärkeimpiä hakusanoja Boolen operaattoreita ja katkaisua hyväksikäyttäen. Näin yritettiin varmistaa tarpeeksi kattava otanta, joka antaisi relevantteja tuloksia. Tulosjoukkoa rajattiin käyttämällä perättäisten fasettien strategiaa eli suorittamalla useampia tarkennettuja hakuja yhdistäen eri hakusanoja.

2.2 Käytetyt tietokannat

Käytettyjä tiedonhakujärjestelmiä olivat Scopus, Google Scholar, Web of Science, Lappeenrannan teknillisen yliopiston NELLI-portaalin tärkeimmät kone- ja materiaalitekniikan tietokannat ja SFS-Online standardikirjasto. Kaupallisia NDT-sovelluksia haettiin Google-hakukoneen avulla.

2.3 Tiedonhaun tulosten analysointitavat

Löydettyjä lähteitä analysoitiin niiden julkaisemisvuoden ja hakusanojen relevanssin mukaan. Myös lähteen viittausmäärää toisiin tutkimuksiin kartoitettiin ja vahvuutta pyrittiin määrittämään review–määrillä ja erilaisilla vaikuttavuuskertoimilla. Rajattiin tulokset vain full text –artikkeleihin, karsien pelkät tiivistelmät pois. Yritettiin myös löytää ns. alan guruja, jotka olisivat tuottaneet paljon materiaalia. Lähteitä selatessa käytettiin hyödyksi myös tiedonhakujärjestelmien ehdottamia vastaavia lähteitä. Otsikoltaan sopivista lähteistä sisältöä kartoitettiin lukemalla abstrakti ja päätettiin sen jälkeen hyödynnetäänkö lähdettä lopullisessa kirjallisuuskatsauksessa.

3 NDT-TARKASTUKSEN TEORIAA JA REAALIAIKAISTEN MENETELMIEN ESITTELY

Hitsien NDT-tarkastuksella pyritään selvittämään hitseissä esiintyviä virheitä ja vikoja. Hitsausvirheeksi lasketaan hitsin geometrian poikkeamat ja epäjatkuvuuskohdat. Vika taas määritetään ei-sallituksi virheeksi. (SFS-EN ISO 6520-1, 2007, s. 8.) Hitsausvirheiden luokittelusta sulahitsauksen osalta standardissa SFS-EN ISO 6520-1 (2007, s. 8) virheet jaotellaan kuuteen luokkaan:

- halkeamat
- ontelot
- sulkeumat
- liittymävirheet
- muoto- ja mittavirheet
- muut virheet.

NDT-tarkastus perustuu testattavan kappaleen pinnalla tai sisällä olevien fyysisten ilmiöiden havainnointiin. Jotta tarkastuksella saavutettaisiin käyttökelpoista informaatiota, on testin antamia tuloksia osattava tulkita oikein. Joskus useita NDT-menetelmiä on yhdistettävä tai verrattava niiden tuloksia toisiinsa testauksen luotettavuuden lisäämiseksi. (CEN ISO/TR 25107, 2006, s. 1.)

Rikkomattomat aineenkoetustestit voidaan jakaa karkeasti kahteen ryhmään niillä havaittavien virheiden mukaan. Nämä ryhmät ovat pinta- ja volumetriset tarkastusmenetelmät. Pintamenetelmillä havaitaan vain pinnan virheet, kuten halkeamat, ja volumetrisillä hitsin sisällä olevat virheet, kuten huokoset. (Cherfaoui, 2012, s. 267.) Tärkeimmät teollisuudessa käytetyt ainetta rikkomattomat testausmenetelmät ovat pääryhmittäin jaoteltuna esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Tärkeimmät aineenkoetustestit lyhenteineen (mukaillen Cherfaoui, 2012, s.267).

Pintamenetelmät	**Volumetriset menetelmät**
Visuaalinen tarkastus (VT)	Ultraäänitarkastus (UT)
Tunkeumanestetarkastus (PT)	Radiografinen tarkastus (RT)
Magneettijauhetarkastus (MT)	Termografinen tarkastus (TI)
Pyörrevirtatarkastus (ET)	Optinen spektroskopia (OSI)

Normaaliin, hitsauksen jälkeen erikseen suoritettavaan, NDT-tarkastukseen voidaan lukea kuuluvaksi useita menetelmiä, joita ei kuitenkaan voida hyödyntää reaaliaikaisessa tarkastuksessa. Yhtenä esimerkkinä on tunkeumanestetarkastus, joka voidaan automatisoida täysin, mutta siitä huolimatta joudutaan odottamaan tunkeumanesteen tunkeuma-aika ja kehiteaineen reagoiminen tuloksen saamiseksi. (Lüthi, 2014, s. 61–75.)

Seuraavissa alakappaleissa käydään läpi reaaliaikaisessa aineenkoetuksessa käytettyjä menetelmiä. Menetelmälistaus ei kata kaikkia mahdollisia sovelluksia, vaan siinä on keskitytty teollisuudessa käytettyihin yleisimpiin sovelluksiin.

3.1 Radiografinen tarkastus

Radiografinen tarkastus on vanhimpia NDT-menetelmiä ja sitä on suoritettu jo noin kuusikymmentä vuotta. Sen suurimpana etuna muihin menetelmiin nähden on sen kyky tuottaa kuvatiedosto testattavan materiaalin sisältä. Radiografinen testaus suoritetaan yleensä joko röntgen- tai gammasäteiden avulla. (da Silva et al., 2004, s. 461.)

Metodi perustuu vaurioituneen tai virheellisen kohdan suurempaan energian absorptioon perusaineeseen verrattuna. Virhe näkyy tuotetussa kuvassa onnistunutta hitsiä tummempana kohtana. Yleisimpiä hitseissä esiintyviä virheitä, jotka voidaan havaita radiografisessa NDT-testauksessa ovat kuonasulkeuma, huokoisuus, ontelot, liitosvirheet ja halkeamat. (Valavanis & Kosmopoulos, 2010, s. 7606.)

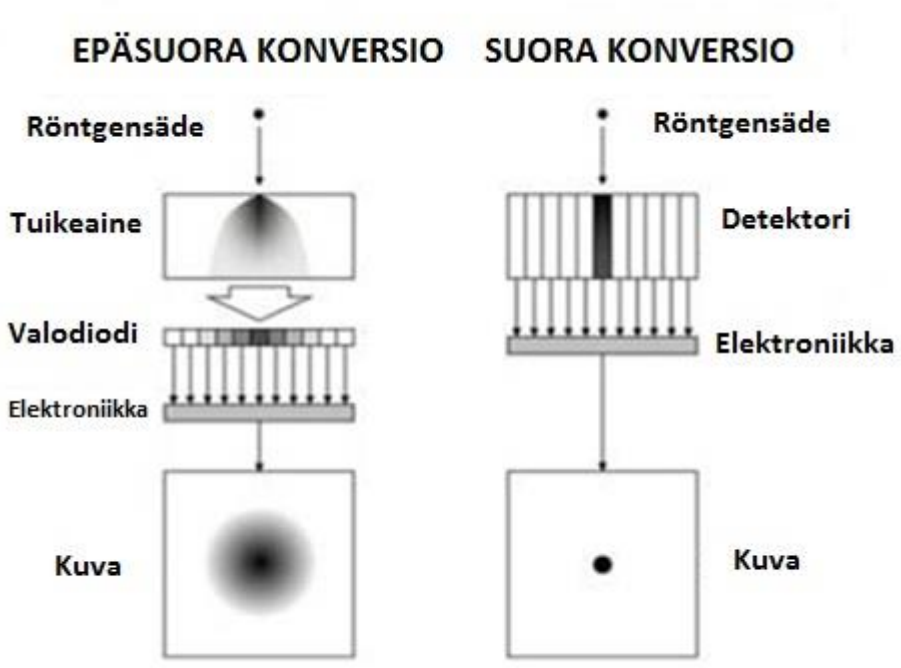
Perinteisesti radiografinen tutkimus on suoritettu säteilyttämällä kappaleen taustalla olevaa filmiä, johon muodostuu kuva kappaleesta ja virheistä. Filmiin muodostuu negatiivi, joka joudutaan kehittämään saadakseen lopullinen kuva. Nykyisin ollaan siirtymässä filmiprosessin hitaudesta, korkeista kustannuksista ja mahdollisista terveyshaitoista johtuen

digitaaliseen radiografiaan, joilla näitä haittavaikutuksia saadaan poistettua ja kuvaus voidaan suorittaa reaaliajassa. Laajasti käytetty reaaliaikainen radiografia (Real-time radiography, RTR) on saanut kilpailijan digitaalisesta radiografiasta (Digital radiography, DR) ja tietokoneistetusta radiografiasta (Computed radiography, CR). Näiden kolmen menetelmän (RTR, DR ja CR) etuna perinteiseen filmiradiografiaan on niiden kyky muodostaa kuva kohteesta reaaliajassa. (Pardikar, 2008, s. 1–3.)

Digitaalisessa radiografiassa käytetään levydetektoria (FPD, Flat Panel Detector), jonka avulla kuva saadaan siirrettyä reaaliajassa tietokoneelle ilman muuta optiikkaa tai mekaanista skannausta. Röntgensäteet muutetaan sähkövaraukseksi ja siitä digitaalikuvaksi. FPD-tekniikalla saavutetaan korkealaatuisia kuvia, joiden signaali-kohina–suhde (SNR, Signal-to-Noise Ratio) on pienempi kuin perinteisessä filmiradiografiassa. (Pardikar, 2008, s. 3.)

Levydetektorien toimintaperiaatteita on kaksi; epäsuora- ja suora konversio. Epäsuora konversio perustuu valodiodimatriisiin, jota luetaan ohutkalvotransistorin avulla. Detektoriin tulevat röntgensäteet osuvat ensiksi cesium-jodi–tuikeaineeseen, joka muuntaa röntgensäteet valoksi. Valodiodit varautuvat valon fotonien avulla. Tämä varaus muutetaan elektronisiksi signaaleiksi, jotka vahvistetaan ja digitoidaan. Valo ohjataan suoraan piikiekolle, jolla pyritään vähentämään lateraalista diffuusiota. Tämä parantaa kuvantarkkuutta. Seuraavaksi digitaalinen data prosessoidaan kuviksi. Kuvia voidaan katsoa suoraan näytöltä, tulostaa tai tallentaa tietokoneelle. Tietokoneen avulla kuvia voidaan jälkiprosessoida tai arkistoida. (Pardikar, 2008, s. 3.)

Suoran konversion levydetektorit perustuvat valojohteeseen kuten amorfisessa muodossa olevaan seleeniin tai kadmiumtelluridiin usean mikroelektrodin levyllä, jota luetaan ohutkalvotransistorilla. Tämän tyyppisessä detektorissa röntgensäteen fotonit konvertoidaan suoraan elektronisiksi signaaleiksi. Nämä signaalit vahvistetaan ja digitoidaan. (Pardikar, 2008, s. 3.) Kuvassa 1 on esitetty suoran- ja epäsuoran konversion erot ja niiden vaikutus kuvanlaatuun.



Kuva 1. Epäsuoran ja suoran konversion erot (mukaillen i3system, Inc., 2015).

Koska suora konversio ei vaadi tuikeaineen käyttöä, lateraalista leviämistä ei esiinny. Tästä johtuen suoran konversion avulla saavutetaan parempi hyötysuhde ja korkeampiresoluutioinen kuva kuin epäsuoralla konversiolla. (Pardikar, 2008, s. 3.)

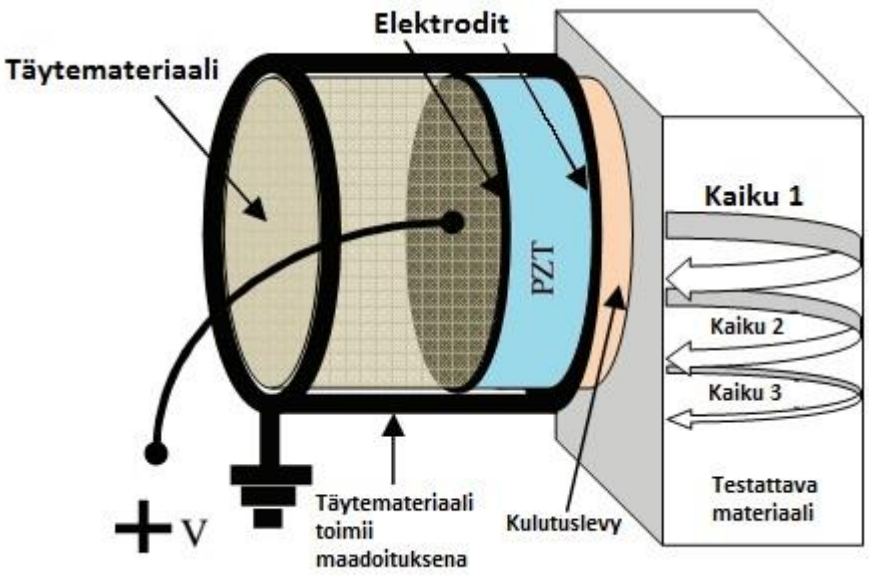
3.2 Ultraäänitarkastus

Ultraäänitarkastuksessa hitsin sisältämiä vikoja tutkitaan ultraääniaaltojen avulla. Ultraääneksi lasketaan ihmiskorvan kuulemattomissa olevat korkeataajuuksiset ääniaallot. Taajuuden alarajana katsotaan yleensä olevan n. 18 kHz. Taajuuden noustessa aallonpituus lyhenee ja mahdollistaa tarkemman mittaustuloksen. Esimerkiksi lääketieteellisessä ultraäänitutkimuksessa käytetyt taajuudet vaihtelevat 2 ja 20 MHz välillä. (El Kouche & Hassanenin, 2012, s. 136.) Teollisuudessa käytetyimmät NDT-tarkastuksen taajuusalueet ovat välillä 1–10 MHz (SFS-EN 583-1, 1998, s. 10).

Menetelmät jakaantuvat, riippuen tutkittavan kappaleen geometriasta ja käytetystä laitteistosta, joko läpäisytekniikkaan tai pulssikaikutekniikkaan. Läpäisytekniikassa ultraääniaaltoja lähetetään kappaleen läpi ja tutkitaan läpi päässyttä signaalia.

Pulssikaikutekniikassa ultraääntä emittoidaan hitsin pintaan ja takaisin heijastuneen signaalin laatua ja siroutumista tutkitaan. (SFS-EN 583-1, 1998, s. 6.)

Tyypillisesti ultraäänitarkastuksessa käytetyt lähettimet ja anturit ovat pietsosähköilmiöön perustuvia ja materiaaliltaan lyijy-zirkonaatti-titanaattia (PZT). Pulssikaikutekniikassa voidaan käyttää yhtä lähetin-anturi -konfiguraatiota, jolla värähtely emittoidaan kappaleeseen ja mitataan takaisin heijastunutta signaalia, kun taas läpäisytekniikassa lähetin ja anturi ovat erillisiä. Kuvassa 2 on esitetty tyypillisen pulssikaikuanturin rakenne. (El Kouche & Hassanein, 2012, s. 137.)



Kuva 2. Pietsosähköisen anturin havainnekuva (mukaillen El Kouche & Hassanein, 2012, s. 137).

Ultraääni voidaan myös synnyttää kappaleeseen esim. pulssitettua laseria hyväksikäyttäen. Tällöin kappaleen pintaa altistetaan lasersäteelle, joka aiheuttaa ablaation ansiosta värähtelyjä. Nämä värähtelyt voidaan havaita joko perinteisellä kappaleen kanssa kosketuksissa olevilla pietsosähköisillä antureilla tai kosketuksettomilla elektromagneettisella äänianturilla (EMAT). (Miller et al., 2002, s. 1259)

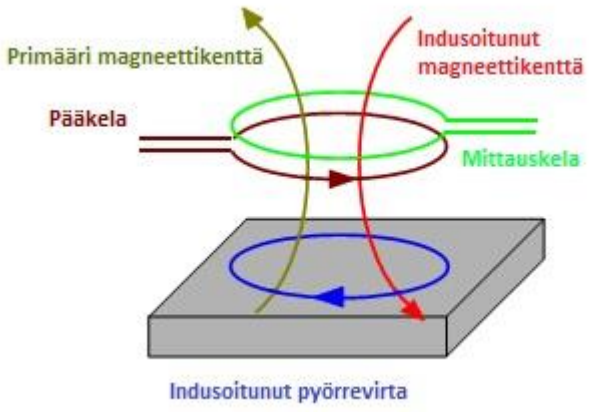
Kosketuksettomia antureita hyväksikäytettäessä joudutaan laskemaan ultraäänen kulkuaika (ToF, Time of Flight) ablaatioalueelta kappaleen läpi EMAT-anturille. Mittauksissa syntynyttä dataa verrataan teoreettisen ToF-arvoon ja tästä pystytään määrittämään hitsin

geometria. Useimmissa tapauksissa valmiin hitsin geometria on hyvä indikaattori hitsin laadulle. (Miller et al., 2002, s. 1259)

Yksi viimeisimpiä ultraäänitutkimuksen kehitysvaiheita on ollut vaiheistetun ultraäänen hyödyntäminen. Periaate on käyttää useita lähettimiä, jotka voidaan ohjelmoida lähettämään signaalia erilaisilla viiveillä. Reaaliaikasovelluksissa anturin havaitsemat signaalit tallennetaan yhtaikaa ja viiveajat summataan jälkikäteen. Suurin osa teollisuudessa käytetyistä lähettimistä ovat yksiulotteisia eli niissä on suorakaiteen muotoinen rivi lähettimiä vierekkäin. Normaalisti kaupallisissa laitteissa on 16–128 erillistä lähetintä. Myös kaksiulotteisia (2D, Two Dimensional) antureita käytetään lääketieteellisissä sovelluksissa ja niillä saadaan aikaan kolmiulotteinen kuva (3D, Three Dimensional). (Quaegebeur & Mason, 2012, s. 1056.)

3.3 Pyörrevirtatarkastus

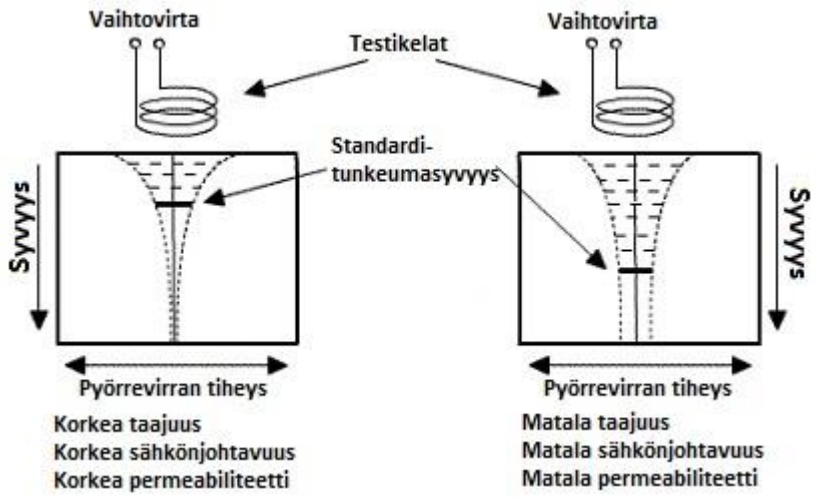
Pyörrevirtatarkastus perustuu elektromagneettiseen induktioon. Kun vaihtovirta kytketään johtimeen (normaalisti kela), magneettikenttä syntyy sekä johtimeen että johtimen ympärille. Magneettikenttä laajenee samalla kun vaihtovirta kasvaa ja häviää virran tippuessa nollaan. Kun dynaamiseen magneettikenttään tuodaan toinen johdin (esimerkiksi tarkastettava metallikappale) siihen indusoituu pyörrevirtoja. Pyörrevirrat taas aiheuttavat omat sekundääriset magneettikenttänsä. Virheet havaitaan pyörrevirtojen muutoksen aiheuttaman impedanssin vaihtelusta. (NDT Education Resource Center, 2016a.) Kuvassa 3 on esitetty pyörrevirtatarkastuksen periaate.



Kuva 3. Pyörrevirtatarkastuksen periaate (mukaillen Lüthi, 2014, s. 120).

Pyörrevirtojen voimakkuus heikkenee eksponentiaalisesti mitä kauempana ne ovat johtimesta. Pyörrevirran tunkeutumissyvyys riippuu vaihtovirran taajuudesta, materiaalin sähkönjohtavuudesta ja magneettisesta permeabiliteetistä. Tunkeumasyvyys pienenee kun taajuus, sähkönjohtavuus tai permeabiliteetti kasvaa. (Lüthi, 2014, s. 120.)

Pyörrevirtoja esiintyy vain magneettikentän vaikutusalueella kappaleessa. Kuvassa 4 on esitetty pyörrevirran tehotiheyden muuttuminen suhteessa tutkimussyvyyden vaihteluun. Pyörrevirtojen tehotiheys pienenee mitä syvemmälle tutkittavaan aineeseen mennään. Kun tehotiheys on laskenut arvoon 1/e (Neperin luku), eli noin 37 %:iin pinnalla olevasta tiheydestä, kutsutaan tätä standarditunkeumasyvyydeksi. (NDT Education Resource Center, 2016b.)

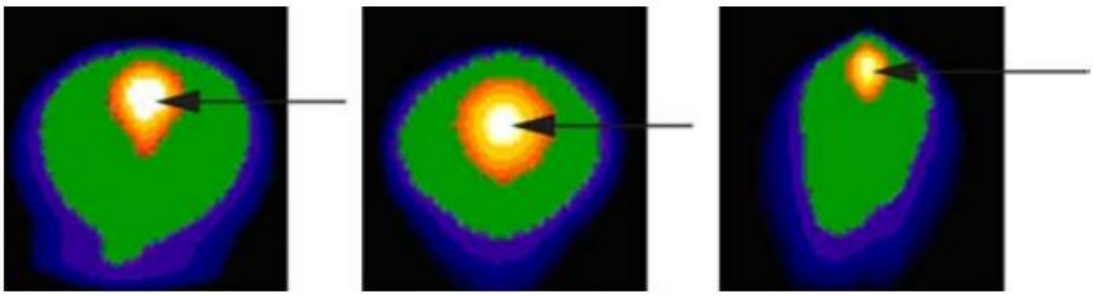


Kuva 4. Pyörrevirtatarkastuksen parametrien vaikutus tehotiheyteen eri syvyyksillä (mukaillen NDT Education Resource Center, 2016b).

Jotta pyörrevirtatarkastuksen tarkkuus saadaan riittäväksi, on otettava huomioon se, että pyörrevirta on tarpeeksi voimakas tutkittavan virheen kohdalla. Tästä syystä tutkimuksessa käytetty taajuus on valittava tutkittavan materiaalin ominaisuuksien ja arvioidun virhekohdan syvyyden mukaan. Normaalisti virheet pyritään paikallistamaan yhden standardisyvyyden sisälle. (NDT Education Resource Center, 2016b.)

3.4 Termografia

Termografia on yksi viimeisimmin esitellyistä NDT-tarkastustavoista. Se perustuu infrapunakameralla havaittaviin hitsin lämpöviivojen monitorointiin eikä vaadi välitöntä pintakosketusta. Termografia soveltuu hyvin kaarihitsauksen monitorointiin, koska prosessissa syntyy aina lämpösäteilyä. (Sreedhar et al., 2012, s. 1557.) Infrapunakameralla kuvatuista lämpöviivoista muodostetaan lämpökartta, jota kutsutaan termografiksi. (Nandhitha et al., 2010, s. 20). Kuvassa 5 on esitetty eri prosessiparametreilla suoritettuja TIG-hitsauksesta otettuja termografeja ennen piirteiden erottamisen suorittamista. Nuolella on merkitty elektrodin paikka termografissa. Valkoinen väri on kuvassa lämpimin alue ja musta viilein.



Kuva 5. TIG-hitsauksen esimerkkitermografeja (Nandhitha et al., 2010, s.22).

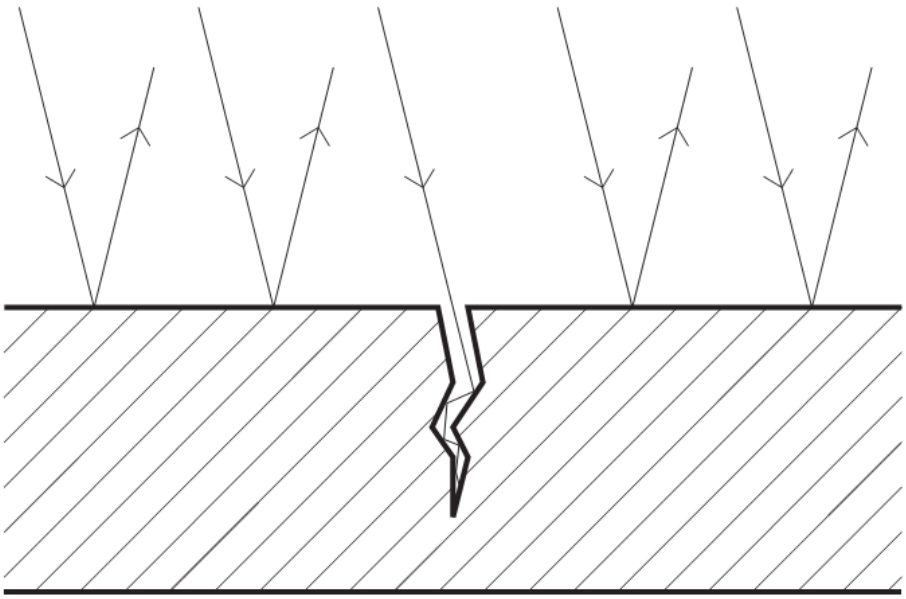
Kaarihitsauksessa hitsisulan korkein lämpötila on hitsauselektrodin kohdalla. Kun hitsauspoltinta liikutetaan, syntynyt hitsi jäähtyy ja lämpöviivat muodostuvat yhtäsuuntaisesti hitsiin nähden. Kun lämmöntuonti on jatkuvaa ja hitsauspoltinta liikutetaan, muodostuu tilanne, jossa lämpöviivat pysyvät vakioetäisyydellä elektrodista ja liikkuvat elektrodin mukana. Näitä lämpöviivoja tarkkailemalla saadaan tietoa hitsin laadusta. (Sreedhar et al., 2012, s. 1557–1558.) Mitä yhtenäisempi termografi on, sitä vähemmän virheitä hitsi sisältää. Virheet näkyvät termografissa normaalia korkeampina tai matalampina lämpötila-alueina. (Nandhitha et al., 2010, s. 20–21.)

Termografiset menetelmät voidaan jakaa kahteen pääryhmään; passiivisiin ja aktiivisiin tekniikoihin. Passiivisilla tekniikoilla monitoroidaan kappaleen lämpövuota sen perustilassa. Aktiivisissa tekniikoissa kappaletta lämmitetään tai viilennetään ulkoisin keinoin (esimerkiksi salamalampulla). Sulahitsauksen tarkastuksessa passiivisia tekniikoita

käytetään hitsisulan tarkkailuun ja aktiivisilla etsitään jo jähmettyneestä hitsistä pintavirheitä. (Lüthi, 2014, s. 49; Nandhitha et al., 2010, s. 21.)

Virheitä havaitaan analysoimalla digitaalisessa muodossa olevia termografeja erilaisin kuvanprosessointialgoritmein. Näitä algoritmejä ovat muun muassa histogrammin tasaus, kuvan segmentointi ja morfologinen kuvan prosessointi. Infrapunatermografialla voidaan havaita käytetty suojakaasuyhdiste, muutoksia hitsin leveydessä, perusainevahvuuden vaihtelun aiheuttamia tunkeumasyvyyden vaihteluita, railokoon vaihteluita ja epäpuhtauksien esiintymistä hitsissä. (Nandhitha et al., 2010, s. 21.)

Pintavirheiden tarkistus voidaan suorittaa aktiivista termografiaa hyväksi käyttäen. Menetelmä perustuu särön suurempaan lämpöenergian absorptioon. Infrapunavalon (säteilylähteenä esim. laser tai salamalamppu) heijastuessa särön seinämistä sen energiaa absorboituu enemmän kuin ehjälle pinnalle, josta valo heijastuu kerralla pois. Tämä ilmiö on havainnollistettu kuvassa 6. (Broberg, 2013, s. 69–70.)



Kuva 6. Särön suurempi energian absorptio (Broberg, 2013, s. 70).

Suuremmasta energian absorptiosta johtuen särö havaitaan infrapunakameraa hyväksi käyttäen muuta pintaa lämpimämpänä alueena. Säröjen havainnointiin vaikuttaa muun

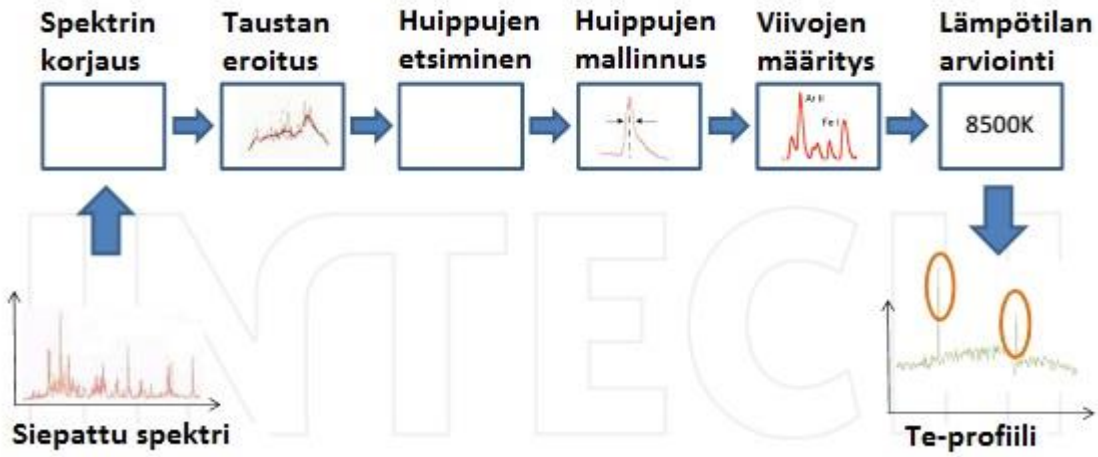
muassa särön leveys, sen kallistuskulma ja käytetty aallonpituus. Särön leveys toimii käytännössä aallonpituuden maksimipituutena, koska särön leveyttä pidempi aalto ei pääse tunkeutumaan pintaa syvemmälle ja pienenee nopeasti intensiteetiltään, jolloin se ei käytännössä vaikuta särön lämpötilaan. Kuitenkin säteilylähteenä suositellaan käytettävän mahdollisimman pitkiä taajuuksia, jotta ehjän pinnan ja särön välinen kontrastiero saadaan kuvassa mahdollisimman suureksi ja SNR-suhdetta paremmaksi. Aallonpituuden valintaan vaikuttaa myös havaitsemisessa käytetyn IR-kameran tarkkuus. (Broberg, 2013, s. 70.)

3.5 Optinen spektroskopia

Hitsin optinen spektroskopia perustuu hitsatessa syntyvän plasman emittoiman säteilyn analysointiin. Hitsausprosesseista plasmaa muodostuu muun muassa kaari- sekä laserhitsauksessa. Virheitä havaitaan monitoroimalla näkyvän valon (aallonpituus noin 380–740 nm) säteilyn muuttumista hitsatessa. Valoa kerätään optisella kuidulla, muokataan CCD-spektrometrillä ja analysoidaan prosessointiyksikön avulla. (Cobo et al. 2011, s. 195.)

Prosessissa käytetään hyödyksi sulahitsauksessa syntyvän plasman vahvaa optista emissiota. Tietyt alkuaineet emittoivat muista erottuvan joukon spektriviivoja, joten niiden pitoisuudet voidaan erottaa plasmasta. Koska spektriviivojen intensiteetti on suhteessa alkuaineiden ja niiden ionien osuudesta plasmassa, voidaan niiden perusteella verrata hitsausprosessin tilaa ja onnistumista aiemmin koostettuihin testeihin. (Cobo et al. 2011, s. 187–188.)

Yleisesti käytössä oleva tapa säteilyn analysoimiseksi on plasman elektronilämpötilan (Te) arvon laskeminen. Plasman Te-arvojen muutoksilla tiedetään olevan suora yhteys hitsin laatuun. Te-profiilin määritys vaatii kuitenkin useita prosessointivaiheita ja pidentää tästä syystä reaaliaikaista laskenta-aikaa. (Zhang et al., 2013, s. 1147.) Kuvassa 7 on esitetty klassinen tapa määrittää Te-arvoja hitsauksen spektristä.



Kuva 7. Te-profiilin määrittämiseen vaadittavat työvaiheet (mukaillen Cobo et al., 2011, s.189).

Toinen vähemmän laskentatehoa vaativa analysointimenetelmä on yksittäisten spektrin taajuusalueiden (SOI, Spectrum bands of interest) haarukointi. Zhang et al. (2013) tutkimuksessa valittiin kahdeksan taajuusaluetta hitsausvirheiden syntymekanismien ja materiaalin maksimisingulariteetin sääntöjen perusteella. Erityyppisiä hitsausvirheitä analysoitaessa löydettiin tiettyjä staattisia parametreja, joiden vaihtelua verrattiin hitsissä olevaan virheeseen ja onnistuneeseen hitsiin. (Zhang et al., 2013, s.1146-1147.)

3.6 Muita reaaliaikaisia menetelmiä

Muita mahdollisia hitsin reaaliaikaiseen tarkastukseen käytettäviä prosesseja ovat mm. hitsaussuuttimen ja perusaineen kapasitiivinen monitorointi (tutkittu muun muassa keyhole-laserhitsauksella) ja hitsauksen akustisen emission analysointi sekä ultraääni- että ihmiskorvalla havaittavan äänen taajuuksilla. (Cobo et al. 2011, s. 187.)

Kapasitiivinen mittaus perustuu hitsatessa tapahtuviin sähkökentän muutoksien monitorointiin. Onnistuneella hitsillä mittaus antaa vakioarvon ja hitsausvirheet havaitaan poikkeamista tuloksissa. Yleisille virheille (vajaa tunkeuma, >0,1 mm reikien syntyminen, liitosvirheet) on saatu tutkimuksissa jopa yli 95 %:n havaitsemisvarmuus. Menetelmän suurin heikkous on sen perustuminen vain yhden muuttujan monitorointiin. Tämä tekee virheiden luokittelun vaikeaksi. (Cobo et al. 2011, s. 187.)

Tutkijat ovat havainneet, että sekä kaari- että laserhitsauksessa syntyvää akustista emissiota mittaamalla voidaan havaita hitsin virheitä. Ääntä monitoroidaan sekä ihmiskorvalla havaittavissa olevalla että ultraäänialueella. Myös akustisen emission monitoroinnin heikkous on hitsausvirheiden luokittelun vaikeus. Tosin äänispektrin staattisella analysoinnilla on saatu lupaavia tuloksia hitsin laadun mittaamisessa. (Cobo et al. 2011, s. 187.)

Vaikka laserilla tapahtuva railonseuranta on yleistynyt, ei hitsien 3D-laserskannaukseen perustuva hitsin NDT ole vielä yleisesti teollisuuden käytössä. Laserskannauksella voidaan tutkia hitsin geometriaa ja pintavirheitä, kuten liitosvirheitä ja halkeamia. (SERVO-ROBOT, 2016.)

4 REAALIAIKAISTEN NDT-MENETELMIEN EDUT JA HEIKKOUDET

NDT-tarkastuksen automatisointiin liittyy myös kustannustehokkuuden parantamisen lisäksi pyrkimys parantaa testauksen laatua ja nostaa virheiden havaitsemisprosenttia. Jotta reaaliaikaiset menetelmät voisivat kilpailla jälkikäteen suoritettavien tarkastusprosessien kanssa, on niillä saatujen tulosten luotettavuuden oltava vähintään yhtä hyvä kuin ihmisen suorittamalla tarkastuksella.

Ihmisen suorittama tarkastus on aina subjektiivinen prosessi. Jopa kokeneet ja koulutetut tarkastajat tekevät virheitä. Osa hitsien virheistä voi jäädä havaitsematta esimerkiksi ajanpuutteen takia. Myös tarkastajan henkinen tila voi vaikuttaa tarkastuksen tulokseen. Tutkimuksissa on havaittu, että sama tarkastaja voi saada ristiriitaisia tuloksia samasta näytteestä pelkän mielentilan vaihtelun takia. (da Silva et al., 2004, s. 461; Valavanis & Kosmopoulos, 2010, s. 7606.) Ihmisten suorittamaan tarkastukseen vaikuttavat muun muassa seuraavat hitsausprosessiin liittyvät ja siitä täysin riippumattomat seikat (Lüthi, 2014, s. 14):

- työympäristö; valaistus, melu, tärinä yms.
- tarkastajan terveydellinen tila
- tarkastajan valppaus
- tarkastajan koulutus, kokemus, tietotaito
- psykologinen ympäristö; stressi, ulkoinen paine, työn monotonisuus
- muut henkilökohtaiset ominaisuudet; tarkkuus, tunnollisuus, motivaatio.

Reaaliaikaisella NDT-tarkastuksella pyritään poistamaan ihmisen suorittaman tarkastuksen laadunvaihtelu ja saamaan tarkastus täysin automaattiseksi. (Pardikar, 2008, s. 8.) Monet reaaliaikaiset NDT-prosessit perustuvat testisignaalin vaihteluiden analysointiin. Tällaisia tarkastusmenetelmiä ovat muun muassa ultraäänitarkastus, termografia, optinen spektroskopia, pyörrevirtatarkastus ja akustiseen emissioon perustuva tarkastus. Näissä menetelmissä tulos on aina arvio pohjautuen aiemmin havaittujen tietyntyyppisten virheiden aiheuttamaan testisignaalin käytökseen. Tämä aiheuttaa ongelmia virheiden luokittelussa. Toisaalta radiografisella tarkastuksella saadun kuvatiedoston avulla virheet on mahdollista luokitella tarkemmin. (Valavanis & Kosmopoulos, 2010, s. 7606.) Seuraavissa

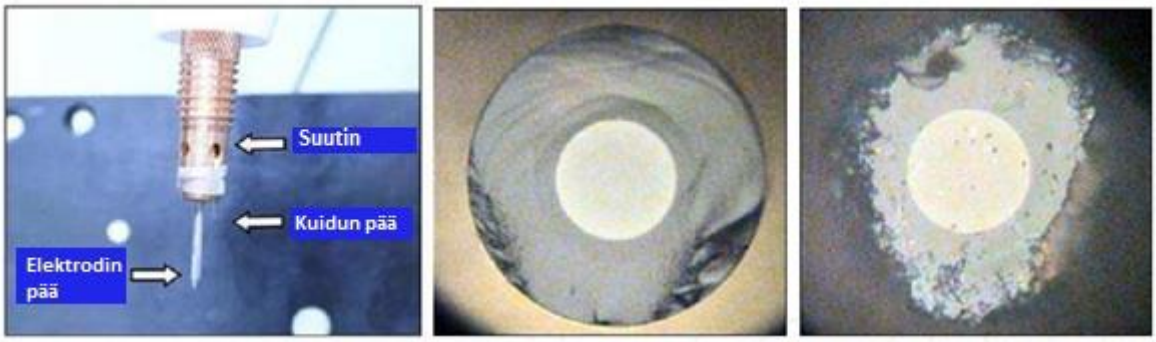
alakappaleissa käydään läpi yksittäisten NDT-tarkastusprosessien vahvuuksia sekä heikkouksia ja esitetään tämänhetkisiä ratkaisuja tarkastuksen automatisointiin.

4.1 Optinen spektroskopia

Yksi spektroskooppisen NDT-prosessin vahvuuksista on soveltuvuus eri materiaaleille ja hitsauksen prosessiparametreille. Kuitenkin hitsattavan materiaalin fyysiset ominaisuudet on oltava tiedossa etukäteen, jotta materiaalin emissioviivoja voidaan verrata hitsatessa syntyvään emissioon. (Cobo et al., 2011, s. 199-200.) Toisena etuna voidaan nähdä testilaitteiston arvokkaampien instrumenttien, kuten CCD-spektrometrin (varauskytketty kenno, Charge-Coupled Device) ja prosessointiyksikön sijoitusmahdollisuus kauas kuluttavista olosuhteista. Prosessi on myös immuuni hitsatessa syntyville elektromagneettisille häiriöille. (Cobo et al., 2011, s. 188.)

Prosessin heikkoutena voidaan kaarihitsauksessa nähdä se, että optinen sensori (usein valokuitu) joudutaan asettamaan lähelle plasman syntypaikkaa. Tästä aiheutuu ongelmia sekä hitsaus- että mittausprosessiin muun muassa korkeiden lämpötilojen, höyryjen ja heijastumien aiheuttamien mittausvirheiden sekä polttimen rajoitettuna paikoitusmahdollisuuksina (ei voida esimerkiksi asettaa poltinta pieneen kulmaan, jolloin optinen kuitu on liian lähellä plasmaa). (Cobo et al. 2011, s. 195.)

Näitä ongelmia on pyritty ratkaisemaan MIG- ja TIG–hitsauksessa asettamalla paljas optinen kuitu suoraan suojakaasusuuttimen reikään, jolloin kaasun virtaus jäähdyttää kuitua. Tällä asennustavalla estetään myös hitsisulan heijastumien aiheuttamat häiriöt mittausprosessiin. Vaikka optisen kuidun päässä havaitaan hitsausprosessin aiheuttamia ulkoisia vaurioita, on todistettu, ettei niillä ole merkittävää vaikutusta kuidun ytimen kuntoon. Kuidun kärsimät vauriot 100:n hitsaustestin (kaariaika 800 s) jälkeen on havainnollistettu kuvassa 8. (Cobo et al. 2011, s. 195.)



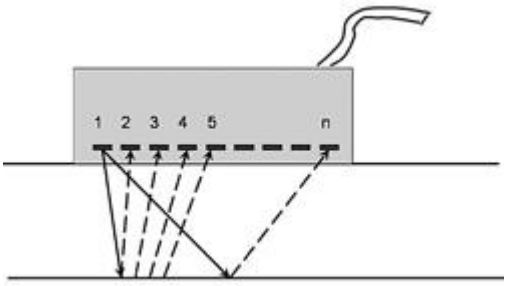
Kuva 8. TIG-polttimeen upotettu optinen kuitu (vasemmalta oikealle) ja mikroskooppikuvat kuidun päästä ennen ja jälkeen 100 hitsaustestin. (mukaillen Cobo et al. 2011, s. 195).

Useiden hitsaustestien jälkeen kuiduista on mittauksilla havaittu tietyillä ultravioletti-aallonpituuksilla (UV, Ultra Violet) tapahtuvaa signaalin heikkenemistä. Tämä johtuu intensiivisestä plasmasäteilystä. Ilmiö pystytään estämään käyttämällä erikoisvalmisteisia solarisaationkestäviä valokuituja. (Cobo et al. 2011, s. 195.)

Reaaliaikaisessa tarkastuksessa suuri haaste on prosessin tuottama suuri datan määrä ja sen analysointi. Tyypillisessä tapauksessa havainnoidaan kymmeniä tuhansia aallonpituusalueita per sekunti. Erilaisia tekniikoita on kehitetty tarkastuksen optimoimiseksi ja tulosten laadun parantamiseksi. Näitä ovat muun muassa Te-profiilin analysointi, spektrin neliöllisen keskiarvon (RMS, Root Mean Square) laskeminen ja keinotekoisen neuroverkkojen (ANN, Artificial Neural Network) käyttö. (Cobo et al. 2011, s. 199–200.) Myös yksittäisten spektrin taajuusalueiden (SOI) hyväksikäyttöä on tutkittu (Zhang et al., 2013, s.1146–1147).

4.2 Ultraääni

Ultraäänitarkastus voidaan suorittaa useiden lähetin-anturi -elementtien avulla. Tämän tyyppisen tarkastuksen nimitys on täyden matriisin sieppaus (FMC, Full-Matrix Capture). FMC:llä saadaan tarkasteltua jokaisen lähetin-anturi–yksikön lähettämää ja vastaanottamaa signaalia. (Quaegebeur & Mason, 2012, s. 1056.) Jokainen lähetin emittoi ultraääntä vuorollaan ja jokainen anturi rekisteröi vastaanotetun signaalin. Näin jatketaan, kunnes jokaisella lähettimellä emittoidun ultraäänen aika-paikka –signaali saadaan rekisteröityä. (BINDT, 2016.) Kuvassa 9 esitetään lähetinyksiköstä numero 1 lähetetty signaali ja datan kerääminen vastaanottimilla 2–n.



Kuva 9. FMC:n periaate (BINDT, 2016).

Täyden matriisin signaalia voidaan prosessoida erilaisin algoritmein, kuten esimerkiksi kulkuajan laskennalla (ToF), kääntäen verrannollisen aaltokentän extrapolaatiolla (inverse wave field extrapolation), synteettisen apertuurin tarkennuksella (synthetic aperture focusing) tai superresoluutiotekniikoilla (superresolution techniques). (Quaegebeur & Mason, 2012, s. 1056.)

Yksi parhaista tekniikoista FMC:n tuottaman datan prosessointiin on kokonaisfokusointimetodi (TFM, Total Focusing Method). TFM:ssä käytetään kaikkia lähetin-vastaanotin–yksikön elementtejä, joilla fokusoidaan jokaiseen tarkastettavan kappaleen tarkastelupisteeseen. TFM:n avulla saadaan muodostettua skalaarikuva tai vauriovektori. Tällä prostprosessointialgoritmilla saadaan muita edellä mainittuja menetelmiä parempi resoluutio ja kuvanlaatu, ja siksi sitä käytetään nykyään referenssimentelmänä. (Quaegebeur & Mason, 2012, s. 1057; Njiki et al., 2013, 1164–1167.)

Vielä vuonna 2012 Quaqebeur & Masonin (2012) mukaan TFM:ää ei oltu otettu käyttöön reaaliaikaisessa NDT-tarkastuksessa tietokoneelta tarvittavan suuren laskentatehon takia. Heidän ratkaisunsa menetelmän mahdolliseen käyttöönottoon olisi ollut radikaali anturielementtien määrän vähentäminen. Vähentämällä elementtien määrää 64:ään Njiki et al. (2013) kehittivät vuonna 2013 testausarkkitehtuurin, jolla saavutetaan 73 kuvan per sekunti (FPS Frames per Second) kuvavirta maksimissaan 128x128 pikselin resoluutiolla.

Brobergin (2013, s. 69) mukaan ultraäänitarkastuksen heikkoutena on sen huono kyky tunnistaa virheitä lähellä tutkittavan kappaleen pintaa. Tämä esiintyy vain pinnan kanssa kosketuksissa olevien antureiden kanssa. Myös pinnan läheisyydessä olevien säröjen suunta vaikuttaa tarkastustulokseen. Hitsien tarkastuksen suorittamisen haittana on myös akustisten

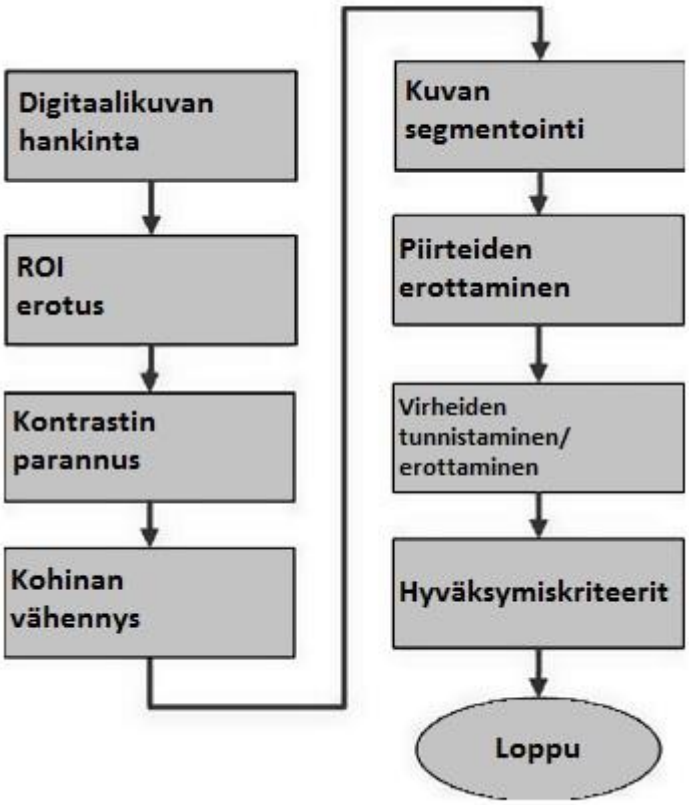
tarkastusmenetelmien herkkyys hitsauksessa syntyvälle kohinalle. (Mirapeix et al., 2005, s. 358.)

Mekaanisesti synnytetyn akustisen emission avulla tarkistettaessa tarvitaan usein kova pintapaine tarkastuksen suorittamiseen. Ylimääräinen rasitus saattaa aiheuttaa vaurioita tarkastettavaan kappaleeseen. Elektromagneettisesti tuotetulla akustisella emissiolla (EMAE) pystytään kuitenkin suorittamaan tarkastus kosketuksettomasti, saavutetaan perinteisiä pietsosähköisiä lähetin-antureita parempi resoluutio ja pystytään tarkastamaan kaarevia ja karkeapintaisia kappaleita. Menetelmä soveltuu kuitenkin ainoastaan sähköä johtaville materiaaleille. (Her & Lin, 2014, s. 17147.)

4.3 Radiografinen tarkastus

Perinteisesti hitsien radiografisten kuvien tulkintaan on käytetty ihmisiä tarkastajina. Tämän takia tarkastustulos on vaihdellut suuresti tarkastajan henkilökohtaisten ominaisuuksien, kuten kokemuksien ja pätevyyden mukaan. Näiden syiden takia radiografiseen tarkastukseen on pyritty kehittämään täysin automatisoituja tarkastusjärjestelmiä. Vuonna 2002 ei oltu vielä kehitetty teollisiin käyttökohteisiin soveltuvia systeemejä. (Wang & Liao, 2002, s. 519–520.) Vuonna 2010 Valavanis & Kosmopoulos (2010, s. 7606–7614) kehittivät automaattisen tarkastusjärjestelmän, jolla saatiin lupaavia tuloksia hitsien tarkastamiseen. Kandidaatintyötä varten suoritetulla Internet-haulla (hakupäivämäärä 9.6.2016) ei löydetty teolliseen hitsien automaattiseen radiografiseen tarkastukseen soveltuvia systeemejä.

Suurin osa vuonna 2010 tutkimuksen alaisena olleista automatisoiduista radiografien tarkastusjärjestelmistä on noudattanut kuvassa 10 esitettyä prosessia. Digitaalisen radiografian avulla saadun kuvatiedoston hankinnan jälkeen kuva rajataan koskemaan vain tarkastuksen kannalta haluttuja alueita (ROI, Region of interest). Kuvanlaatua parannetan muun muassa kontrastia parantamalla ja vähentämällä kuvan kohinaa. Tämän jälkeen kuvasta segmentoidaan virhealueita, joista erotellaan ominaispiirteitä. Tämän jälkeen piirteitä analysoidaan ja lopuksi päätetään onko virhe hyväksyttävissä vai joudutaanko se hylkäämään. (Valavanis & Kosmopoulos, 2010, s. 7606–7610).



Kuva 10. Radiografisen automatisoidun NDT-tarkastuksen vaiheet (mukaillen Valavanis & Kosmopoulos, 2010, s. 7607).

Radiografisen tarkastuksen suurimpia etuja muihin menetelmiin nähden ovat sen kyky erottaa käytännössä kaikenlaisia hitsausvirheitä kuten kuonasulkeuma, huokoisuus, ontelot, liitosvirheet ja halkeamat. Toisena etuna voidaan nähdä menetelmän kappaletta koskematon suoritustapa. (Valavanis & Kosmopoulos, 2010, s. 7606.)

Digitaalisen radiografian edut verrattuna filmiradiografiaan ovat, ettei siinä jouduta käyttämään terveydelle ja ympäristölle haitallisia aineita, se mahdollistaa pienempien säteilymäärien hyväksikäyttämisen ja sillä on mahdollista saavuttaa parempi kuvanlaatu. (Pardikar, 2008, s. 2.) Radiografisen tarkastuksen heikkoutena on sen kyky tunnistaa vikoja lähellä tutkittavan kappaleen pintaa, johtuen säröjen pienestä tilavuudesta (Broberg, 2013, s.69).

4.4 Termografia

Termografia tarjoaa etuja perinteisiin konenäköön perustuviin tarkastusjärjestelmiin verrattuna, koska sillä saadaan parempi arvio hitsin lämpötilajakaumasta. Lämpötilajakauman perusteella pystytään suoraan määrittämään hitsin onnistumista. Kaarihitsaus on myös prosessina aina lämpöä tuottava, jolloin ei tarvita erillistä säteilylähdettä tarkastuksen suorittamiseksi. Termografisella kuvauksella (2D) saadaan havaittua myös alueellista ja aikayksikköön sidottua dataa. (Cobo et al. 2011, s. 187.)

Haittoina passivisessa termografiassa voidaan pitää hitsausprosessin tuottamaa interferenssiä toivotun signaalin kanssa. Kaarihitsaus synnyttää lämpösäteilyä ja tuottaa kaasua, joka voi häiritä infrapunakameraa (IR, Infrared). Näitä ongelmia voidaan kuitenkin vähentää käyttämällä mekaanisia tai optisia keinoja signaalin suodattamiseen. Myös kameran asemoinnilla voidaan vähentää edellä mainittuja ongelmia. (Sreedhar et al, 2012, s. 1558–1559.) Cobo et al. (2011) mukaan teollista ympäristöä kestävien IR-kameroiden saatavuus on ollut rajattua vuonna 2011.

Koska aktiivinen termografia tarjoaa kappaleen pintaa koskemattoman, nopean tarkastuksen, jolla voidaan löytää pieniäkin (5–10 μm) säröjä, se tarjoaa hyvän vaihtoehdon automaattiseen tarkastukseen. Reaaliaikaisessa hitsien pintavirheiden tarkastuksessa se tarjoaa hyvän vaihtoehdon pyörrevirtatarkastukselle. (Broberg, 2013, s. 69.)

Pintavirheiden tarkastuksessa parhaaksi havaittu säteilylähde on laser, koska sitä on helppo hallita niin lämmitettävän alueen koossa kuin lämmityspulssin pituudessakin. Haittapuolena laservalon käytössä on korkeatehoisten laser-laitteistojen suuri koko, kallis hankintahinta ja pitkäaaltoisen lasersäteen kohdistaminen, jos ei voida käyttää optista kuitua säteen ohjaukseen. Salamalamput ovat pienempiä ja helpompia liikutella, mutta kärsivät laseriin verattuna liian suuresta aallonpituudesta. Salamalamppujen ongelmana on myös pulssittamisen vaikeus. Salamalamput tuottavat pääpulssin jälkeen epätoivottuja heijastumia, jotka saattavat vääristää tuloksia. (Broberg, 2013, s. 72–73.)

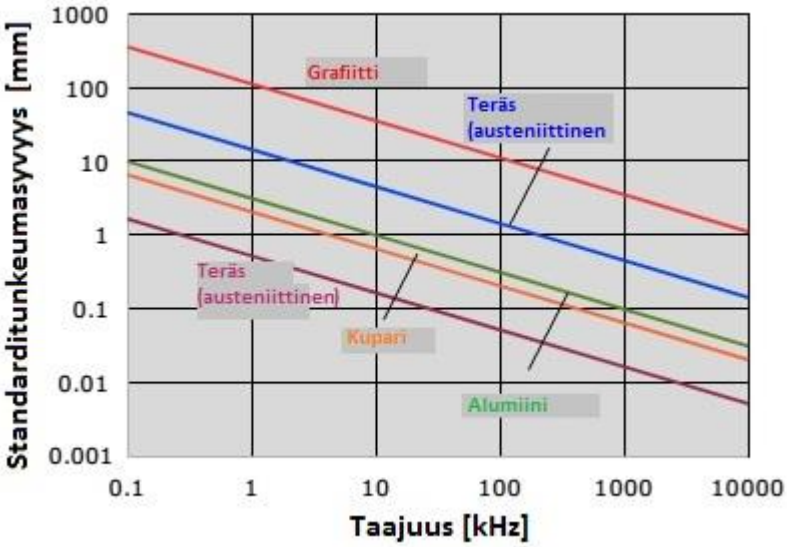
4.5 Pyörrevirtatarkastus

Pyörrevirtatarkastuksen etuina voidaan nähdä herkkyys havaita pieniä pinta- ja pinnan läheisyydessä olevia virheitä. Yleisesti käytetyt pyörrevirtatarkastusmenetelmät havaitsevat

pienimmillään 1,27 mm:n murtumia 99 % luotettavuudella. Kuitenkin saavuttaakseen näin hyvät havaitsemistulokset tarvitaan tarkka tunkeumasyvyyden määrittely ja anturin asettelu. (Ghoni et al., 2014, s.2)

Toisaalta tarkastettavia kappaleita ei tarvitse esivalmistella ja tarkastus voidaan suorittaa kosketuksettmasti. Tästä syystä pyörrevirtatarkastuksella voidaan myös tarkastaa monimutkaisen muotoisia kappaleita. Reaaliaikaista NDT-tarkastusta ajatellen hyvänä puolena voidaan pitää tarkastuksen jälkeen heti saatavia tuloksia. (NDT Education Research Center, 2016a.)

Suurin heikkous pyörrevirtatarkastuksessa on sen soveltuvuus ainoastaan sähköäjohtaville materiaaleille. Sulahitsauksessa kuitenkin yhteenliitettävät materiaalit ovat lähes poikkeuksetta metallisia ja johtavat sähköä. Toinen heikkous on se, että materiaali ominaisuudet on tiedettävä alkuparametreja säädettäessä. Muutoin tarkastustulos ei pidä paikkaansa tai tarkastuksen tarkkuus kärsii. Kuvassa 11 on esitetty materiaalin ja taajuuden vaikutus tunkeumasyvyyteen. (NDT Education Research Center, 2016a.)



Kuva 11. Eri materiaalien standarditunkeumasyvyyksiä suhteessa taajuuteen (mukaillen Lüthi, 2014, s. 121).

Pintavirheitä tarkastettaessa pyörrevirtatarkastuksen haittapuolena taas voidaan nähdä se, että anturi joudutaan asettamaan varsin lähelle kappaletta ja tarkastus on herkkä

pinnankarheuden vaihteluille. (Broberg, 2013, s.69.) Myöskään osaa kelan ja tarkastussuunnan kanssa yhdensuuntaisista virheistä ei voida tarkastaa pyörrevirtatarkastuksella. Tällaisia virheitä ovat muun muassa komposiiteissa esiintyvä lamellien aukeaminen. (NDT Education Research Center, 2016a.)

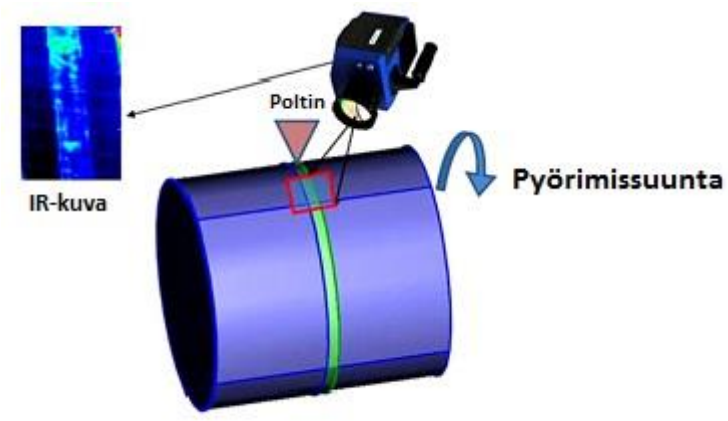
4.6 CASE-esimerkkejä

Tässä kappaleessa on esitelty muutamia teollisiin tarkoituksiin tutkimuksen alaisena olleita reaaliaikaisia NDT-järjestelmiä. Pyrittiin löytämään mahdollisimman kattavasti eri menetelmiin perustuvia NDT-tarkastustapoja.

4.6.1 Polttoainetankin TIG-hitsin termografinen online-tarkastus

Suuria (halkaisijaltaan 4 m) avaruuskäytössä olevia nestemäisen polttoaineen tankkeja hitsataan tällä hetkellä TIG-prosessilla. Hitsattavat levyt (ainevahvuus 9 mm) ovat materiaaliltaan alumiiniseosta AA2219. Hitsattava rakenne on kiinnitettynä pyörivään kiinnittimeen. Valmiissa hitsissä on kaksi palkoa ja ne tarkastetaan jälkikäteen radiografiaan perustuvalla tekniikalla. Jos löydetään virheitä, ne joko korjataan tai koko rakenne hylätään. Hitsin korjaus aiheuttaa ylimääräistä työtä ja hidastaa läpimenoaikaa hitsauspolttimen kohdistuksen ja levyjen kiinnittimeen asettamisen tarkan asemoinnin takia. (Sreedhar et al., 2012, s. 1557.)

Jälkikäteen suoritettavat korjaukset myös lisäävät työaikaa ja aiheuttavat toimituksiin viivästyksiä, mikä tulee yritykselle kalliiksi (Sreedhar et al., 2012, s. 1557). Kuvassa 12 on esitetty periaatekuva tarkastukseen käytetystä infrapunakamerasta, hitsauspolttimen asemoinnista, hitsattavasta rakenteesta ja hitsaussuunnasta.



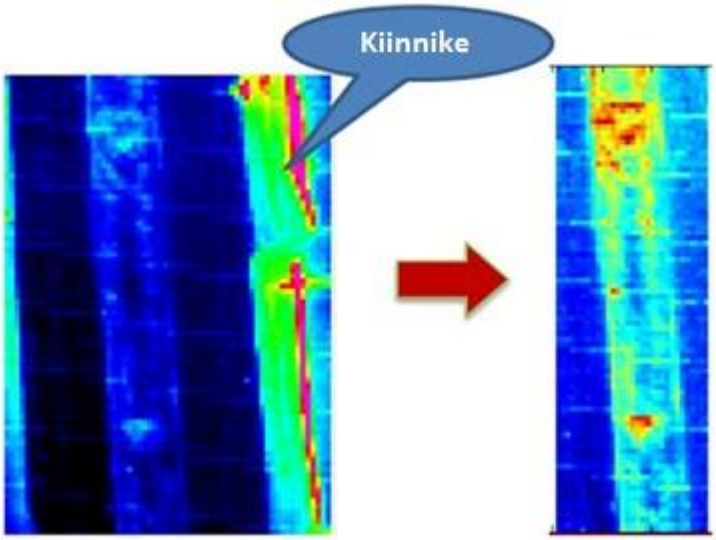
Kuva 12. Periaatekuva termografisesta tarkastusjärjestelmästä (mukaillen Sreedhar et al., 2012, s. 1558).

Tarkastusjärjestelmässä infrapunakamera on asetettu pyörimissuunnan suuntaisesti 60° kulmaan hitsattavaan kappaleeseen nähden niin, että kuvaan saadaan noin 100 mm:n alue vastahitsattua hitsiä. Käyttökohdetta vasta varten suunniteltu rajapinta siirtää termografit tietokoneelle jatkoanalyysia varten. Yhden täyden päittäishitsin hitsaamiseen kuluu aikaa noin 50 minuuttia. Termografeja tallennetaan korkealla kuvanopeudella, noin 500 FPS, ja ne tallennetaan videomuotoon. (Sreedhar et al., 2012, s. 1559–1560.)

Suurimpia haasteita raakakuvien analysoinnissa olivat raakadatan sisältämän ylimääräisten alueiden poistaminen, kameran kallistuskulman, jota ei voitu muuttaa hitsattavan kappaleen geometrian takia, aiheuttama pisteenseurannan vaikeus ja kuvien kerääminen liikkuvasta kappaleesta, jolloin hitsin lämpöhistorian selvittäminen hankaloitui. Myös virheiden tarkka paikannus yksittäisestä kuvasta oli haastavaa. (Sreedhar et al., 2012, s. 1560–1561.)

Tarkastusta varten kehitettiin algoritmeja, joilla saatiin selvitettyä termografeissa esiintyvän tietyn pisteen jäähtymisaste. Ensimmäinen algoritmi erittelee termisen datan yksittäisiksi kuviksi. Näiden yksittäisten kuvatiedostojen sisältämä data (paikka, lämpötila ja aika) muunnetaan matriisimuotoon. Kuvassa 13 esitetyssä automaattisesti skaalatussa termografissa vasemmassa kuvassa nähdään teräksisen kiinnikkeen (kuvassa: fixture) huomattavasti korkeampi lämpötila, joka johtuu teräksen alumiinia pienemmästä lämmönjohtavuudesta. Jotta saataisiin dataa vain hitsin alueelta, algoritmi rajaa aluetta

koskemaan vain hitsiä. Tämän rajauksen vaikutus termografiin on esitetty kuvassa 13 olevan nuolen oikealla puolella.

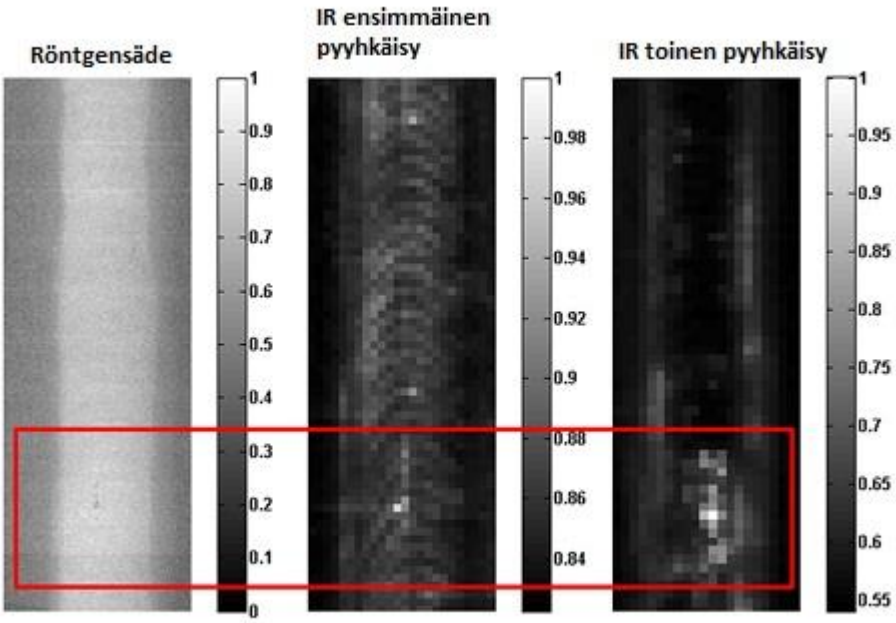


Kuva 13. Termografi ennen ja jälkeen kuvan rajausta (mukaillen Sreedhar et al., 2012, s. 1561).

Dataa analysoimalla havaittiin, että yksittäinen pikseli esiintyy kuva-alueella 12 sekuntia. Havaittiin myös, että onnistuneen hitsin lämpötila vaihtelee noin 5 °C alueella. Tätä lämpötila-aluetta korkeammat lämpötilat sisältävät hitsausvirheitä. Näitä tuloksia hyödyntämällä pystyttiin muodostamaan raja-arvo, jolla onnistunut hitsi ja virheellinen alue saadaan eroteltua toisistaan. (Sreedhar et al., 2012, s. 1561.)

Toinen algoritmi kehitettiin, jotta voitiin vertailla radiografisen tarkastuksen ja IR-kameralla suoritetulla tarkastuksella kerättyä dataa. Radiografinen tarkastus suoritettiin jälkikäteen hitsistä ja sillä saadaan tulokseksi sarja liuskamaisia kuvatiedostoja koko hitsin kehältä. Jotta liikkuvasta kappaleesta otettuja termografeja voitaisiin vertailla radiografien kanssa, piti kehittää tapa muodostaa staattisia kuvia datasta. Toisen algoritmin avulla muodostettiin edellä mainittuja kuvia ja korjattiin kameran asemoinnista johtuva kallistus. Kuvassa 14 nähdään esimerkkivertailu hitsausvirheestä. Vasemmalla on radiografi, keskellä ensimmäisen hitsipalon termografi ja oikealla toisen palon termografi. Suorakulmiolla merkityllä alueella esiintyvä virhe luokiteltiin huokoseksi, joka on halkaisijaltaan noin 0,5 mm. Huokoset ovat alumiinin hitsauksessa tyypillisesti esiintyviä virheitä. Kuvasta nähdään

selvä yhdenmukaisuus radiografisen ja termografisen tarkastuksen tuloksissa. (Sreedhar et al., 2012, s. 1561–1563.)



Kuva 14. Radiografisen- ja IR datan vertailukuva (Sreedhar et al., 2012, s.1563).

Seuraavaksi liuskamaiset termografit jaoteltiin 1–n määrään N-kolumneja ja M-rivejä. Tästä ruudukosta laskettiin lämpötilan varianssi ja keskiarvo kullekin 1–n kolumnille ja riville. Kolmas algoritmi yhdistää edellisten algoritmien tulokset ja tunnistaa termografin ääriviivojen perusteella kuumia pisteitä. Lopuksi radiografisen ja termografisen tarkastuksen avulla löydettyjä virheitä verrattiin keskenään. Ensimmäisen ja toisen termografin havaitsemat virheet yhdistettynä niillä havaittiin 91 % radiografisen tarkastuksen havaitsemista hitsin hylkäykseen johtavista virheistä. Ainoat virhetyypit, jotka jäivät havaitsematta termografisella testauksella, olivat muotovirheet ja erittäin pienet huokoset. (Sreedhar et al., 2012, s.1563–1564.)

4.6.2 Radiografinen NDT putkimaisissa kappaleissa

Bharat Heavy Electricals Limited (BHEL) tehdas Trichyssä, Intiassa on käyttänyt RTR-tekniikkaa höyrykattiloiden putkien päittäishitsien online-tarkastukseen. Heillä on ollut käytössä 320 kV röntgensädelähde yhdistettynä kuvanvahvistinlaitteistoon. NDT-laitteiston

ansiosta hitsaaja saa tiedon hitsin onnistumisesta reaaliajassa ja voi suorittaa tarvittavat korjaukset heti. (Pardikar, 2008, s. 2.)

Päittäishitsit hitsataan MIG-prosessilla ja putkien ulkohalkaisijat vaihtelevat välillä 38–78 mm. Ainevahvuudet vaihtelevat putkesta riippuen välillä 4–12 mm. Yleisimpiä virheitä, joita kyseisessä prosessissa syntyy ja pyritään erityisesti monitoroimaan, ovat huokoisuus, sulkeumat, halkeamat, reunahaava, riittämätön tai liiallinen tunkeuma ja läpipalaminen. (Pardikar, 2008, s. 2.)

Jotta radiografisesti päästäisiin tarvittavaan tarkkuuteen tasomaisten vikojen (halkeamat, reunahaava, riittämätön tai liiallinen tunkeuma) havaitsemisessa, kuvanlaadun on oltava riittävällä tasolla. Tämä voidaan varmistaa testaamalla laitteiston kuvanlaatuindikaattori-arvo (Image Quality Indicator, IQI). IQI-testaus voidaan suorittaa esimerkiksi kuvaamalla testauskäyttöön tarkoitettuja metallilankapareja. Tässä tapauksessa käytettiin tyypin III A BS 3971: 1985 testausta. (Pardikar, 2008, s. 2.)

RTR-tekniikassa käytettyjen kuvanvahvistimien heikkouksia perinteiseen filmiradiografiaan verrattuna ovat muun muassa rajoittunut resoluutio, huono SNR, matala kontrasti, epälineaarisuus ja rajoittunut dynamiikka-asteikko. Kuitenkin digitaalista jälkikäsittelyä hyväksikäyttämällä kuvanlaatu saadaan parannettua ja tuotua filmiradiografian tasolle. Kuvanvahvistimet kuitenkin kuluvat käytössä, jolloin niiden tuottama kuvanlaatu ei enää täytä laatumääreitä. Tästä johtuen niiden hyödyllinen elinikä on noin 3–4 vuotta, jonka jälkeen ne joudutaan uusimaan. (Pardikar, 2008, s. 2.)

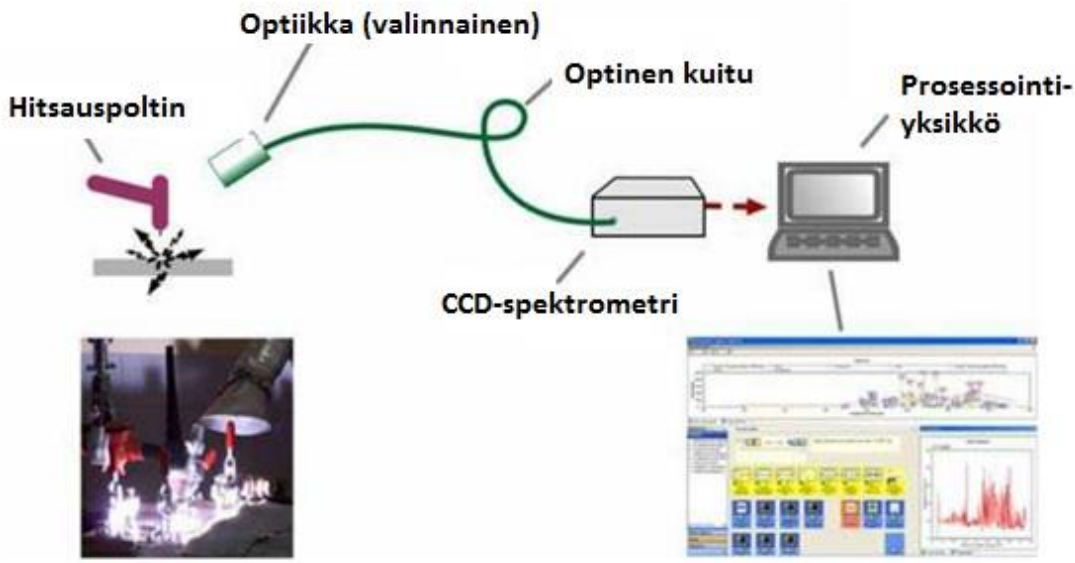
Kuvanvahvistimien rajallisen eliniän takia BHEL:illä haluttiin selvittää vaihtoehtoisten menetelmien mahdollisuutta. Pardikarin (2008) tutkimuksessa selvitettiin saavutetaanko levydetektoreilla hyötyjä verrattuna perinteisiin menetelmiin. Tutkimuksessa suoritettiin useita kokeita, joiden perusteella menetelmiä vertailtiin keskenään. Kokeilla määritettiin muun muassa molempien menetelmien spatiaalinen resoluutio, kontrastiherkkyys, lineariteetti ja signaali-kohina–suhde. (Pardikar, 2008, s. 3.)

Tutkimuksessa havaittiin, ettei filmiradiografiasta digitaaliseen/tietokoneistettuun radiografiaan siirtymisessä ole esteitä kuvanlaatuvaatimusten puolesta. DR-menetelmällä

voidaan korvata RTR-tekniikka putkimaisten kappaleiden hitsien tarkastuksessa jopa 12 mm ainevahvuuksilla. Pikselitiheydeltään 200 μm FPD-detektoreilla voidaan saavuttaa kolmen viivaparin/mm tarkkuus ja yli 20 % spatiaalinen resoluutio. DR-menetelmän automatisoinnilla päästään myös eroon ihmisten suorittaman tarkastuksen subjektiivisista tarkastustulosten vaihteluista. (Pardikar, 2008, s. 8.)

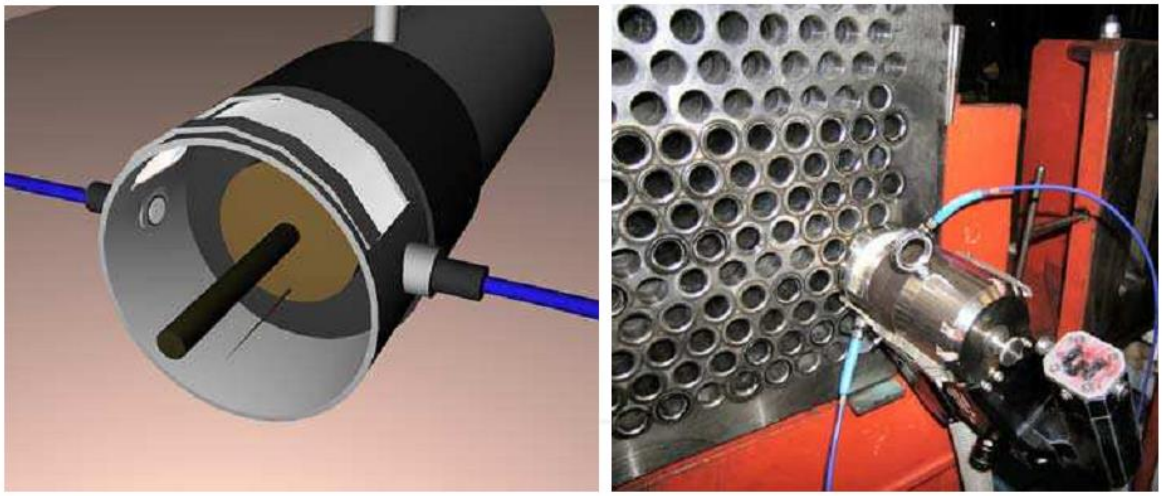
4.6.3 Optisia NDT-kokeiluja höyrygeneraattorien valmistusprosessissa

Espanjassa höyrygeneraattorivalmistaja ENSA (Equipos Nucleares S.A.) on testannut reaaliaikaista NDT-tarkastusta höyrygeneraattorien putkien ja päätylevyjen liittämisessä TIG-hitsausprosessilla. Vaikka ENSA:n käytössäolevilla valmistusprosesseilla on pyritty minimoimaan virheiden syntyminen, on suurten hörygeneraattorien valtava putkimäärä (> 10000 kpl per generaattori) haaste laaduntarkkailun kannalta. Valmiissa hitsissä ei voida hyväksyä pieniäkään huokosia tai muita virheitä, jotka aiheuttaisivat vuotoja, joten generaattoreille suoritetaan korkeapainehydrauliöljyvuototesti niiden havaitsemiseksi. Jos virheitä löydetään tuotantoprosessin viimeisissä vaiheissa, tulee niiden korjaaminen kalliimmaksi ja vie enemmän aikaa, koska kappaletta joudutaan liikuttelemaan työpisteiden välillä ja suorittamaan NDT-testaus useaan kertaan laadun varmistamiseksi. Tästä syystä aikaisessa vaiheessa virheet havaitsevalla reaaliaikaisella NDT-tarkastuksella saavutetaan hyötyjä niin kustannuksia kuin tuotantotehokkuutta ajatellen. ENSA päätyi valitsemaan optiseen plasmaspektroskopiaan pohjautuvan testausmenetelmän. (Cobo et al., 2011, s. 186.) Menetelmän periaate on esitetty kuvassa 15.



Kuva 15. Optisen spektroskopiajärjestelmän periaatekuva (mukaillen Cobo et al. 2011, s. 195).

Putkien orbitaalihitsaukseen kehitetyn mekanisoidun erikoispolttimen takia pelkällä optisella kuidulla tapahtuva valon kerääminen on hankalaa. Tämä johtuu polttimesta, jossa koko elektrodin ympärys on rakenteellisesti suljettu, jotta suojakaasulla saadaan ympäröityä koko hitsi. Rakenne ja elektrodin putken ympärysmitan pituinen liike tekevät valon keräämisen haasteelliseksi, joten ratkaisuksi kehitettiin kuvassa 16 esitetty kahteen kosinikorjaimeen perustuva systeemi. Systeemissä on halkaisijaltaan 600 mikrometrin kuidun päihin kytketyt kosinikorjaimet, joilla valoa saadaan kerättyä kummallakin yli 180° alueelta. Kahden valokuidun informatio yhdistetään 2x1 optisella kytkimellä, josta se ohjataan CCD-spektrometrille. (Cobo et al., 2011, s. 196)



Kuva 16. Erikoispolttimen havainnekuva; vasemmalla CAD-malli polttimesta ja oikealla orbitaalihitsauksessa käytetty erikoispoltin (Cobo et al., 2011, s. 196).

Testeissä käytettiin perusaineena INCONEL 690–metalliseosta, jossa putkien sisähalkaisija oli 19,2 mm ja materiaalivahvuus 1 mm. Hitsauslaitteena käytettiin Arc Machines Inc. Model 227:aa ja hitsauspolttimena saman valmistajan Model 96 orbitaalihitsauspoltinta, jossa on volframielektrodi. Hitsausvirta oli pulssitettu 50 Hz ja maksimissaan 60 A. Suojakaasuna oli argon-helium–seos suhteessa 40–60 %. Valon keräämiseen käytettiin aiemmin mainittuja kahta valokuitua yhdistettynä kahteen kosinikorjaimeen, optiseen kytkimeen ja CCD–spektrometriin. (Cobo et al., 2011, s. 197.)

Kerättyä säteilyä analysoitiin erilaisin prosessein. Nämä prosessit olivat elektronilämpötilan laskenta, taustasäteilyn analysointi, spektrin RMS-arvon laskenta ja ANN:n käyttö. Kaikilla näistä menetelmistä pystyttiin havaitsemaan virheitä ja myös suurelta osien erottelemaan yksittäiset virhetyypit. Tällä tarkastusmenetelmällä pystyttäisiin estämään reaaliajassa osa hitsatessa syntyvistä virheistä.

5 POHDINTA

Kokonaiskuvaa alasta lähettiin hakemaan review-artikkeleista ja kirjoista eri aikakausilta. Näiden perusteella pyrittiin muodostamaan reaaliaikaisen NDT-tarkastuksen nykytilanteesta yleiskuva. Kirjallisuustutkimukseen valittujen lähteiden avulla muodostettiin käsitys NDT-tarkastuksen kehityksestä.

Tällä hetkellä sulahitsausmenetelmillä ei saavuteta teollisessa ympäristössä 100 % virheettömyyttä. Jotta hitsaustuotanto saadaan optimoitua, ei kaikkia havaittujen virheiden takia kannata pysäyttää hitsausprosessia. Virheiden sallittu määrä ja muoto on siis optimoitava vaaditun laadun mukaan. Myöskään mikään lähdekirjallisuudessa esitelty NDT-menetelmä ei havaitse kaikkia virheitä 100 %:sti. Tästä syystä kaikkien virheiden havaitsemiseksi on yhdistettävä useita eri menetelmiä. Usein kaikkia virheitä ei kuitenkaan kustannus- ja laatumielessä kannata korjata. Tällöin soveltuva NDT-tarkastusmenetelmä on valittava juuri käyttökohteen ja yrityksen laadunhallinnan pohjalta.

Hitsien NDT-tarkastuksen onnistuminen on aina hyvin tapauskohtaista ja riippuu muun muassa perusainemateriaalista, materiaalivahvuuksista, hitsausprosessista, käytetyistä prosessiparametreista, hitsin ja kappaleen geometriasta ja hitsissä esiintyvistä yleisimmistä vioista. Tästä syystä tällä hetkellä NDT-tarkastusmenetelmistä ei voi valita parasta kaikkiin käyttökohteisiin sopivaa menetelmää. NDT-prosessien vertailun keskenään tekee myös hankalaksi suuret erot fyysikaalisissa ilmiöissä, joihin ne perustuvat. Tällöin on vaikea löytää universaaleita mittareita, joilla tarkastusprosessit saataisiin luokiteltua keskenään paremmuusjärjestykseen.

Monessa prosessissa NDT-tarkastustehokkuutta ei määritä niinkään mekaanisen laitteiston mittaustarkkuus, vaan tulosten analysointiin käytettyjen algoritmien tehottomuus. Esimerkiksi monet kuvanlaatua parantavat algoritmit eivät ole tarpeeksi kehittyneitä tunnistamaan ja erottelemaan erilaisia hitsausvirheitä. Reaaliaikaisen tarkastuksen vaatiessa n. 30 FPS ruudunpäivitysnopeuden, vaativat epätehokkaat algoritmit liikaa nykyprosessoreilta ja aiheuttavat virhehavaintoja tarkastukseen. (Quaegebeur & Mason, 2012, s. 1056.) Tämä osa-alue on kuitenkin intensiivisen tutkimustyön kohteena ja se tulee

lähitulevaisuudessa paranemaan sallien yhä parempilaatuisen reaaliaikaisen NDT-tarkastuksen suorittamisen.

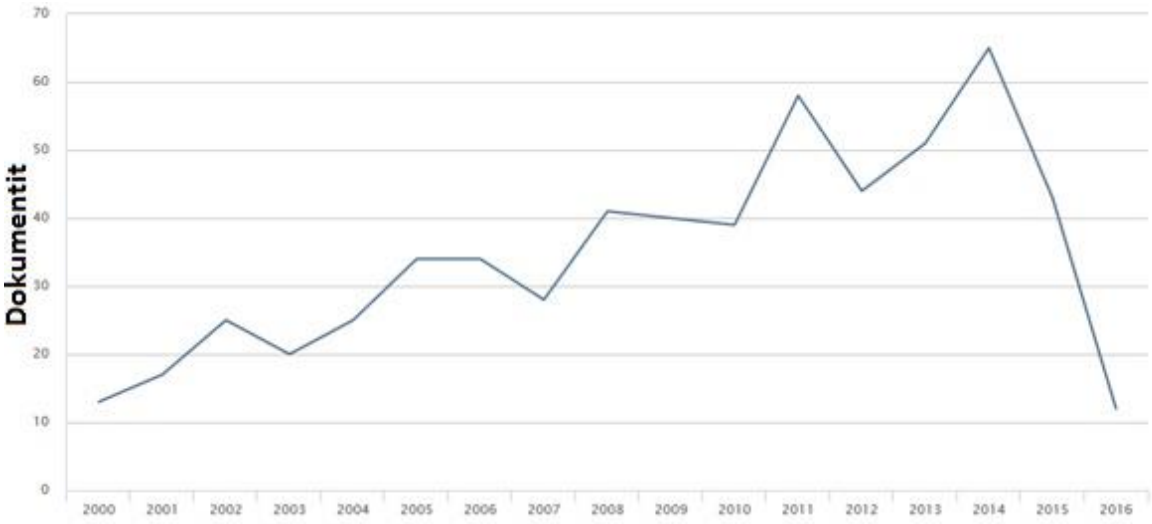
Kirjallisuuskatsauksen lähteitä ja CASE-esimerkkejä etsiessä ei törmätty reaaliaikaisiin hybridi-NDT-tarkastusjärjestelmiin. Näissä järjestelmissä olisi yhdistetty useampia tarkastusmenetelmiä korkeamman tarkastusvarmuuden aikaansaamiseksi. Tällöin myös saataisiin havaittua luotettavasti hitsin pinta- ja volumetriset virheet. Tällainen järjestelmä voisi koostua esimerkiksi automatisoidusta radiografisesta tarkastusjärjestelmästä ja optisesta järjestelmästä. Toinen vaihtoehto voisi olla esimerkiksi ultraäänitarkastuksen ja termografisen pintavirheiden tarkastuksesta yhdistetty kokoonpano. Myös aktiivisen ja passiivisen termografian yhdistävällä järjestelmällä pystyttäisiin havaitsemaan luotettavasti sekä pinta- että volumetrisia virheitä.

5.1 Kirjallisuuskatsauksen tuloksien analysointi

Kirjallisuuskatsauksella saadut tulokset vastasivat hyvin tutkimuskysymyksiin. Johtopäätöksiä varten ei kuitenkaan suoritettu minkäänlaista kvantatiivista arviointia (esimerkiksi nelikenttä-analyysiä (SWOT, Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats) tai vertailutaulukointia) tarkastusmenetelmien mittareiden heikon vertailtavuuden vuoksi.

Haulla yritettiin etsiä review-artikkeleja, jotta saataisiin mahdollisimman laaja käsitys aiheesta. Tiedonhaku painotettiin tutkimuksiin, jotka olivat kokonaisuudessaan saatavilla, eli pelkät abstraktit jätettiin huomioimatta. Yritettiin etsiä lähteitä, jotka ovat vertaisarvioituja, useasti siteerattuja ja mahdollisimman uusia. Vertailun vuoksi otettiin myös vanhempia, heikompia ja kaupallisia lähteitä. Löydettiin myös useita ns. alan guruja, jotka olivat tuottaneet paljon tutkimustietoa. Guruja löydettiin varsinkin optisen spektroskopian puolelta, esimerkkeinä Adolfo Cobo ja Jesús M. Mirapeix.

Hitsien NDT-tarkastus on intensiivisen tutkimuksen alaisena. Tämä pystytään havainnollistamaan Elsevierin tarjoaman Scopus-hakupalvelun avulla suoritetun haun avulla. Haku rajattiin koskemaan hitsien NDT-tarkastusta (hakusanat: NDT AND weld*) ja rajattiin aikakaudeksi vuodet 2000…2016. Kuvassa 17 olevasta graafista nähdään, että tutkimusmäärät ovat olleet jatkuvassa kasvussa vuoteen 2015 saakka. Vuoden 2016 tulosta vääristää se, ettei kaikkia aihealuetta koskevia tutkimuksia ole vielä julkistettu.



Kuva 17. Hitsien NDT-tarkastuksen artikkelimäärä vuosittain. Vuoden 2016 tulosta vääristää pienemmäksi se, ettei kaikkia aihealueen tutkimuksia ole vielä julkistettu (mukaillen Scopus, 2016).

Kaikista NDT-tarkastusmenetelmistä ei löydetty tarpeeksi objektiivisia lähteitä hyvään tutkimustulokseen pääsyä varten. Esimerkkinä on pyörrevirtatarkastus, johon jouduttiin käyttämään sekä vanhempia että kaupallisia lähteitä. Pyörrevirtatarkastuksesta ei myöskään löydetty CASE-esimerkkiä.

5.2 Tutkimuksen luotettavuus ja objektiivisuus

Selvitettiin myös julkaisujen laatuun vaikuttavia suureita. Näistä tärkeimpänä julkaisun vaikuttavuuskerroin (IF, Impact Factor). Esimerkkinä Ghoni et al. (2014) tutkimuksen julkaisun, Advances in Mechanical Engineering vaikuttavuuskerroin oli vuonna 2014 Thomson Reutersin mukaan 0.575 ja arvotus koneenrakennuksen julkaisuissa 96/130. Viimeisten viiden vuoden ajalta vastaavat lukemat olivat: IF 0.787 ja 87/130. Tällöin voidaan olettaa, että julkaisun tutkimuksilla on painoarvoa kyseisellä tieteenalalla. Kaikille käytetyille lähteille tarkastusta ei suoritettu.

Kirjoittajalla ei ennen tämän tutkimuksen aloittamista ollut minkäänlaista ennakkokäsitystä reaaliaikaisen NDT-tarkastuksen nykytilanteesta, joten ennakkokäsitykset eivät vääristäneet tulosta. Tutkimus on suoritettu ilman ulkopuolisen tahon tarjoamaa rahoitusta tai vaikutusta.

5.3 Jatkotutkimusaiheet

Tässä tutkimuksessa ei löydetty hybridi-NDT –järjestelmiä, joilla saataisiin tarkastettua luotettavasti sekä pinta- että volumetriset virheet. Myöskään laitteistokustannuksia ja laitteiden tehollista käyttöikää ei tutkittu pintaraapaisua syvemmältä. Myös tutkimuksen alaisena olleet NDT-menetelmät, kuten Brock et al. (2013), tutkimuksessa laserhitsatessa syntyvän kaasun 3D-analysointi optisilla suurnopeuskameroilla sekä kapasitiivinen NDT ja akustisen emission analysointiin perustuva NDT vaativat jatkotutkimusta ennen kuin voidaan ajatella niiden yleistyvän teollisuusympäristössä. Samalla voitaisiin selvittää soveltuvatko edellä mainitut menetelmät myös kaarihitsauksen tarkastamiseen.

6 YHTEENVETO

Tämän kandidaatin työn tarkoituksena oli kartoittaa reaaliaikaisen NDT-tarkastuksen nykytilannetta. Työn taustana oli Lappeenrannan Teknisellä yliopistolla käytössä olevan robotisoidun adaptiivisen MAG-hitsausjärjestelmän reaaliaikaisen NDT-tarkastusmenetelmän valinta ja siihen liittyvän taustatiedon kerääminen. Tutkimus suoritettiin kirjallisuuskatsauksena.

Työhön selvitettiin mitä reaaliaikainen NDT-tarkastus on ja mitä menetelmiä siihen voidaan käyttää. Tutkimus rajattiin koskemaan vain kaarihitsausprosesseja. Tutkimusongelmaksi muodostui reaaliaikaisen NDT-tarkastuksen nopean kehityksen aiheuttama menetelmien kartoittamisen ja vertailun vaikeus. Tutkimusongelman pohjalta pyrittiin vastaamaan seuraaviin tutkimuskysymyksiin; ”Mikä on reaaliaikaisen NDT-tarkastuksen nykytilanne ja mitä prosesseja siihen voidaan käyttää?” ja ”Mitkä ovat erilaisten reaaliaikaisten NDT-tarkastusmenetelmien edut ja heikkoudet?”

Löydettiin seuraavat reaaliaikaiseen tarkastukseen soveltuvat menetelmät: ultraäänitarkastus, radiografinen tarkastus, optinen spektroskopia, termografia ja pyörrevirtatarkastus. Kaikilla tutkimukseen löydetyillä reaaliaikaisilla menetelmillä on omat vahvuutensa ja heikkoutensa. Työssä esitetään myös CASE-esimerkkejä reaaliaikaisesta hitsien tarkastamisesta.

Tärkeimpinä johtopäätöksinä voidaan nähdä se, että hitsien NDT-tarkastuksen onnistuminen on aina hyvin tapauskohtaista ja riippuu useista muuttujista. Tästä syystä tällä hetkellä NDT-tarkastusmenetelmistä ei voi valita parasta kaikkiin käyttökohteisiin sopivaa menetelmää. Monessa prosessissa NDT-tarkastustehokkuutta ei määritä mekaanisen laitteiston mittaustarkkuus, vaan tulosten analysointiin käytettyjen algoritmien tehottomuus. Tutkimuksessa esitetään myös idea hybridi-NDT-tarkastusjärjestelmästä, jolla saataisiin havaittua tehokkaasti sekä pinta- että volumetrisia virheitä.

LÄHTEET

BINDT. 2016. FMC [The British Institute of Non-Destructive Testing www-sivuilla]. [Viitattu 17.5.2016]. Saatavissa: http://www.bindt.org/What-is-NDT/Index-of-acronyms/F/FMC/

Broberg, P. 2013. Surface crack detection in welds using thermography. NDT&E International, Vol. 57. S. 69–73.

Brock, C. Tenner, F. Klämpfl, F. Hohenstein R. & Schmidt, M. 2013. Detection of weld defects by high speed imaging of the vapor plume. Physics procedia, Vol. 41. S. 539–543.

CEN ISO/TR 25107. 2006. Non-destructive testing - Guidelines for NDT training syllabuses. Technical Committee CEN/TC 138 "Non-destructive testing". Switzerland: European Committee for Standardization. 81 s.

Cherfaoui, M. 2012. Innovative Techniques in Non-Destructive Testing and Industrial Applications on Pressure Equipment. Procedia Engineering, Vol. 46. S. 266–278.

Cobo, A. Mirapeix, J. M. Solana, D. Álvarez-de-Miranda, A. García-Allende, P-B. Conde, O. M. & López-Higuera J. M. 2011. Optical Methods for On-line Quality Assurance of Welding Processes in Nuclear Steam Generators. Steam Generator Systems: Operational Reliability and Efficiency. S. 185–202.

da Silva, R. R. Calôba, L. P. Siqueira M. H.S. & Rebello, J. M.A. 2004. Pattern recognition of weld defects detected by radiographic test. NDT&E International, Vol. 37, Iss. 6 S. 461–470.

Ditchburn, R. J. Burke, S. K. & Scala, C. M. 1996. NDT of welds: state of the art. NDT&E International, Vol. 29, No. 2. S. 111–117.

El Kouche, & A. Hassanein, H. S. 2012. Ultrasonic Non-Destructive Testing (NDT) Using Wireless Sensor Networks. Procedia Computer Science, Vol. 10. S. 136–143.

Ghoni, R. Dollah, M. Sulaiman, A. & Ibrahim, F. M. 2014. Defect Characterization Based on Eddy Current Technique: Technical Review. Advances in Mechanical Engineering. Vol. 2014. 11 s.

Her, S-C. Lin, S-T. 2014. Non-Destructive Evaluation of Depth of Surface Cracks Using Ultrasonic Frequency Analysis. Sensors, Vol. 14. S. 17146–17158.

i3system, Inc. 2016. Digital X-ray [i3system, Inc. www-sivuilla]. [Viitattu 5.4.2016]. Saatavissa: http://www.i3system.com/eng/n_tech/tech2.html

Lüthi, T. 2014. Non-Destructive Evaluation Methods. Course book for course MSE-610 Non-destructive evaluation methods. Ecole polytechnique fédérale de Lausanne. 345 s. Saatavissa:http://phd.epfl.ch/files/content/sites/phd/files/shared/edmx/MSE-610%20% 282014%29.pdf

Miller, M. Mi, B. Kita, A. & Ume, I. C. 2002. Development of automated real-time data acquisition system for robotic weld quality monitoring. Mechatronics, Vol 12, Iss. 9–10. S. 1259–1269.

Mirapeix, J. Cobo, A. Conde, O.M. Jaúregui, C. & López-Hiuguera, J. M. 2005. Real-time arc welding defect detection technique by means of plasma spectrum optical analysis. NDT&E International, Vol. 39, Iss. 5. S. 356–360.

Nadhintha, N. M. Manoharan, N. Rani, B. S. Venkatraman, B. Kalyanasundaram, P. & Raj, B. 2010. Comparative study on the suitability of feature extraction techniques for tungsten inclusion and hotspot detection from weld thermographs for on-line weld monitoring. Indian Journal of Engineering & Material Sciences, Vol. 17. S. 20–26.

NDT Education Research Center. 2016a. Basic Principles of Eddy Current Inspection [NDT Education Research Center www-sivuilla]. [Viitattu 5.4.2016]. Saatavissa: https://www.nde-

ed.org/EducationResources/CommunityCollege/EddyCurrents/Introduction/IntroductiontoET. htm

NDT Education Research Center. 2016b. Depth of Penetration & Current Density [NDT Education Research Center www-sivuilla]. [Viitattu 5.4.2016]. Saatavissa: https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/EddyCurrents/Physics/depthcurrentdensity.htm

Njiki, M. Elouardi, A. & Bouaziz, S. 2013. Total Focusing Method for Non Destructive Evaluation: Toward Real-Time Imaging Systems. 2013 IEEE 56th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS). S. 1164–1167.

Pardikar, R. J. 2008. Digital radiography and Computed radiography for Enhancing the Quality and Productivity of Weldments in Boiler components. 17th World Conference on Nondestructive Testing, 25-28 Oct 2008, Shanghai, China. 8 s. Saatavissa: http://www.ndt.net/article/wcndt2008/papers/596.pdf

Quaegebeur, N. & Mason, P. 2012. Correlation-based imaging technique using ultrasonic transmit–receive array for Non-Destructive Evaluation. Ultrasonics. Vol 52. 1056–1064.

Scopus. 2016. Analyze search results. [Scopus www-sivuilla]. Päivitetty 25.05.2016 [viitattu 25.05.2016].Saatavissa:https://www.scopus.com/term/analyzer.uri?tabSelected=0&origin=email&s=TITLE-ABS-KEY%28NDT+and+weld*+%29+AND+SUBJAREA%28MULT+OR+CENG+OR+CHEM+OR+COMP+OR+EART+OR+ENER+OR+ENGI+OR+ENVI+OR+MATE+OR+MATH+OR+PHYS%29+AND+PUBYEAR+%3E+1999&sort=plf-f&src=s&sdt=b&sot=b&count=589&sl=147&PARM_EXPIRATION_DATE=1464124516127

SERVO-ROBOT. 2016. Laser Weld Inspection [SERVO-ROBOT www-sivuilla]. [Viitattu 5.4.2016]. Saatavissa: http://servorobot.com/laser-weld-inspection/

SFS-EN ISO 6520-1. 2007. Hitsaus ja lähiprosessit. Geometristen hitsausvirheiden luokittelu metallisissa materiaaleissa. Osa 1: Sulahitsaus. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. 52 s. Vahvistettu ja julkaistu englanninkielisenä.

SFS-EN 583-1. 1998. Rikkomaton aineenkoetus. Ultraäänitarkastus. Osa 1: Yleisperiaatteet. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. 23 s. Vahvistettu ja julkaistu englanninkielisenä.

Sreedhar, U. Krishnamurthy, C. V. Balasubramaniam, K. Raghupathy, V. D. & Ravisankar, S. 2012. Automatic defect identification using thermal image analysis for online weld quality monitoring. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 212, Iss. 7. S. 1557–1566.

Valavanis, I. & Kosmopoulos, D. 2010. Multiclass defect detection and classification in weld radiographic images using geometric and texture features. Expert Systems with Applications, Vol. 37, Iss. 12. 2010. S. 7606–7614.

Wang, G. & Liao, T. W. 2002. Automatic identification of different types of welding defects in radiographic images. NDT&E International, Vol. 35, Iss. 8. S. 519–528.

Zhang, Z. Yu, H. Lv, N. & Chen, S. 2013. Real-time defect detection in pulsed GTAW of Al alloys through on-line spectroscopy. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 213, Iss. 7. S. 1146–1156.